

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіотехнічних пристроїв та систем

«На правах рукопису»
УДК 621.396.96

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ С.Я. ЖУК

«___» _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: Алгоритми траєкторної фільтрації за даними активної та пасивної
радіолокаційних систем

Виконав:

студент VI курсу, групи РТ-81мн
Балакірєв Микола Валерійович

Керівник:

Д.т.н., професор Жук Сергій Якович

Консультант з охорони праці:

К.т.н., доцент Каштанов Сергій Федорович

Рецензент:

Д.т.н., професор Шарпан Олег Борисович

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2020 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Радіотехнічний факультет

Кафедра Радіотехнічних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

спеціалізація Радіотехнічні інформаційні технології

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С.Я. ЖУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Балакіреву Миколі Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Алгоритми траєкторної фільтрації за даними активної та пасивної радіолокаційних систем

науковий керівник дисертації д.т.н., проф. завідувач кафедри РТПС
Жук Сергій Якович,

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження процеси оцінювання параметрів руху повітряної цілі
активною та пасивною радіолокаційними системами

4. Предмет дослідження методи оцінювання параметрів руху повітряної цілі
за даними активної та пасивної радіолокаційних систем

5. Перелік завдань, які потрібно розробити аналіз методів визначення координат цілі, аналіз задач вторинної та третинної обробки інформації, аналіз методу калманівської фільтрації, розробка алгоритмів траєкторної фільтрації

за даними РЛС і РДС, розробка алгоритму третинної обробки радіолокаційної інформації, моделювання роботи розроблених алгоритмів, охорона праці.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентація PowerPoint у вигляді слайдів.

7. Орієнтовний перелік публікацій тези конференції

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каштанов С.Ф., к.т.н, доцент		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Аналіз методів визначення координат цілі	3.02-17.02	
	Аналіз задач вторинної та третинної обробки інформації	17.02-3.03	
	Аналіз методу калманівської фільтрації	3.03-17.03	
	Розробка алгоритмів траскторної фільтрації за даними РЛС і РДС	17.03-31.03	
	Розробка алгоритму третинної обробки радіолокаційної інформації	31.03-14.04	
	Моделювання роботи розроблених алгоритмів	14.04-28.04	
	Охорона праці	28.04-11.05	

Студент _____ *М.В. БАЛАКІРЄВ*

Науковий керівник дисертації _____ *С.Я. ЖУК*

*Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської дисертації

на тему: «Алгоритми траєкторної фільтрації за даними активної та пасивної радіолокаційних систем»

Київ — 2020 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	5
1 АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАДАЧІ ТРАЄКТОРНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗА ДАНИМИ АКТИВНОЇ ТА ПАСИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	6
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ЦІЛІ В АКТИВНИХ ТА ПАСИВНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	17
2.1 Методи активної радіолокації	17
2.2 Методи пасивної радіолокації	21
3 АНАЛІЗ ЗАДАЧ ВТОРИННОЇ ТА ТРЕТИННОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	26
3.1 Вторинна обробка РЛІ.....	26
3.2 Третинна обробка РЛІ	28
4 ТРАЄКТОРНА ФІЛЬТРАЦІЯ ПРИ ВТОРИННІЙ ОБРОБЦІ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ДАНИМИ РЛС І РДС.....	29
4.1 Алгоритм калманівської фільтрації	29
4.2 Траєкторна фільтрація за даними РЛС	34
4.2.1 Алгоритм траєкторної фільтрації за даними РЛС	34
4.2.2 Аналіз алгоритму шляхом статистичного моделювання.....	39
4.3 Траєкторна фільтрація за даними РДС	42
4.3.1 Алгоритм траєкторної фільтрації за даними РДС	42
4.3.2 Аналіз алгоритму шляхом статистичного моделювання.....	43
5 ТРАЄКТОРНА ФІЛЬТРАЦІЯ ПРИ ТРЕТИННІЙ ОБРОБЦІ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ДАНИМИ РЛС І РДС.....	47

5.1	Алгоритм траєкторної фільтрації при третинній обробці інформації за даними РЛС і РДС	47
5.2	Аналіз алгоритму шляхом статистичного моделювання.....	57
6	АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ ТРАЄКТОРНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗА ДАНИМИ РЛС І РДС НА СУЧАСНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБАХ.....	63
7	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	68
7.1	Визначення основних потенційно небезпечних і шкідливих виробничих чинників при виконанні науково-дослідної роботи. ...	68
7.2	Технічне рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії.....	69
7.2.1	Електробезпека.....	69
7.2.2	Правила безпеки під час експлуатації ВДТ ПЕОМ.....	71
7.2.3	Вимоги до приміщень в яких розміщені ВДТ ПЕОМ.....	72
7.2.4	Відповідність параметрів мікроклімату в робочій зоні санітарним нормам.....	74
7.2.5	Вимоги до освітлення робочих місць користувачів відеодисплейних терміналів персональних електронно-обчислювальних машин.	75
7.2.6	Виробничий шум.....	75
7.3	Безпека в надзвичайних ситуаціях	77
7.3.1	Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації	77
7.3.2	Вимоги щодо організації ефективної роботи системи оповіщення персоналу при надзвичайних ситуаціях.	78

7.3.3 Пожежна безпека.....	81
ВИСНОВКИ.....	83
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	85

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДРВ	джерело радіовипромінювання
ДС	динамічна система
ДНА	діаграма направленості антени
ЕОМ	електронна обчислювальна машина
РЛІ	радіолокаційна інформація
РЛС	радіолокаційна система
РДС	різницево-дальномірна система
СКВ	середньоквадратичне відхилення
ФАР	фазована антенна решітка
DSP	Digital Signal Processing

ВСТУП

Задача визначення положення повітряних об'єктів має глибоку історію. Технічні рішення для її подолання пройшли значний шлях від примітивних акустичних засобів до сучасних технологічних систем, заснованих на принципах радіолокації. Традиційно вважають, що в основному такі системи мають суто військове призначення, але насправді вони широко використовуються в мирних цілях, наприклад моніторинг цивільного повітряного руху, дослідження космосу тощо.

Як відомо, технологічний розвиток людства не стоїть на місці, а активно рухається в усіх напрямках. А, оскільки радіолокаційні системи є складним технічним комплексом, що стоїть на перетині багатьох галузей технічних наук, то задача розвитку алгоритмів та програмних засобів стоїть поруч з задачами розвитку техніки надвисоких частот, антенної техніки та цифрових обчислювальних систем. Таким чином можливість більш точного визначення положення повітряних цілей включає в себе проблеми оптимізації всіх етапів обробки радіолокаційної інформації.

Метою магістерської дисертації є розробка комплексного алгоритму для максимально ефективної оцінки положення літальних апаратів за даними активної та пасивної радіолокаційних систем. Дослідження алгоритмів проводилось за допомогою програмного середовища Matlab.

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАДАЧІ ТРАЄКТОРНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗА ДАНИМИ АКТИВНОЇ ТА ПАСИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Різноманіття використання РЛС сьогодні продовжує розширюватися, що дозволяє тим самим задіяти їх у військовій справа також наукових дослідженнях. З-поміж інших сфер використання виділяють: транспортну, галузь повітряного флоту та пасажирських і торгових судах. За умови більш деталь-ного дослідження військової області відзначаємо, що РЛС використовуються у військово-повітряних силах, ракетних військах, військово-морському флоті і сухопутних військах. У сфері наукових досліджень Землі РЛС застосову-ються для вивчення атмосфери, космосу тощо.

РЛС наземного типу набули широкого використання і поділяються на станції чергового та бойового режиму і управління повітряним рухом.

Перед РЛС чергового режиму і управління повітряним рухом постають задача виявлення і трасового супроводу повітряних цілей всіх типів у повіт-ряних коридорах і поза ними, встановлення типу цілей та їх державної при-належності, передача інформації до центрів управління,а також видача ко-манд керування повітряними об'єктами.

Задля виконання поставлених задач РЛС чергового режиму мають бути якомога більш прості, дешеві та масові, мати великий час напрацювання на відмову, невелике енергоспоживання і обслуговуючий персонал. А також за-безпечувати максимальну точність визначення власного положення і мати можливість обмінюватись інформацією з іншими об'єктами поля радіолока-ції.

В СМ- і ДМ-діапазонах функціонують радіолокатори бойового режиму і зенітно-ракетних комплексів. Продовжується серія розвитку зенітно-ракетних комплексів С-300 і "Тор".

Потрібний темп аналізу повітряного простору забезпечуються твердотільними активними ФАР, що замінили дзеркальні щілини та пасивні ФАР.

Також варто відзначити дослідження у сфері оцифровування радіолокаційних каналів, підвищення швидкості обробки прийнятих сигналів в реальному часі та впровадження активних ФАР в широкому діапазоні частот.

Основні тактико-технічні характеристики визначають призначення і можливості системи. До їх складу входять області огляду (робочі області), розрізняюча здатність, точність, стійкість, пропускна спроможність, надійність та ефективність в експлуатації.

Розглянемо тактико-технічні характеристики деяких РЛС. Наприклад, трикоординатна РЛС чергового режиму –«НЕБО-СВУ», що функціонує в метровому діапазоні хвиль. Вигляд РЛС «НЕБО-СВУ» наведено на рис.1.1.



Рис.1.1 — РЛС НЕБО-СВУ

РЛС НЕБО-СВУ призначена для автоматичного виявлення, визначення положення і супроводу широкого класу сучасних повітряних об'єктів, а саме:

- літаків стратегічної і тактичної авіації;
- авіаційних ракет типу "АСАЛМ";
- балістичних цілей;
- малопомітних цілей, зокрема, виконаних за технологією "Стелс"

РЛС НЕБО-СВУ виконує:

- виявлення і супровід повітряних цілей;
- визначення державної приналежності повітряних об'єктів;
- пеленгацію постановників шумових активних перешкод;
- розпізнавання класів цілей.

З технічними особливостями РЛС «НЕБО-СВУ» виділяють наступні:

- ФАР з аналогово-цифровим перетворенням сигналів в кожному рядку решітки;
- цифрова просторово-часова обробка сигналів;
- гнучка адаптація системи обробки сигналів до завад і технічного стану станції;
- високоефективна цифрова система слідування, що забезпечує стійку проводку повітряних об'єктів в інтенсивних гідрометеоутвореннях і навмисних пасивних перешкодах;
- адаптивне придушення бічних пелюсток діаграми спрямованості антени.

Технічні характеристики РЛС «НЕБО-СВУ» наведені в табл. 1.1.[1]

Табл.1.1 — Технічні характеристики РЛС «НЕБО-СВУ»

Діапазон	метровий
Дальність виявлення повітряних цілей типу "винищувач" (ЕОП= 2.5 м ²), км, не менше при висоті польоту 500 м	60
10 000 м	270
20 000 м	360
Верхня зона виявлення і вимірювання координат:	
У режимі регулярного кругового огляду, не менше: по висоті, км	40
по куту місця, градуси	15
У режимі супроводу, не менше: по висоті, км	140
по куту місця, градуси	45
Точність вимірювання координат: по дальності, м	100
по азимуту, кутових хв	20
по куту місця, градуси (у діапазоні кутів місця 5-45°)	1.5
Кількість цілей, що супроводжуються	100
Темп оновлення даних, с	5, 10 і 20

Ще одним прикладом трикоординатної РЛС, тільки тепер бойового режиму є «ПРОТИВНИК-ГЕ». На відміну від «НЕБО-СВУ», вона охоплює дециметровий діапазон хвиль. Представимо зовнішній вигляд РЛС «ПРОТИВНИК-ГЕ» на рис.1.2.



Рис.1.2 — «РЛС ПРОТИВНИК-ГЕ»

До призначення РЛС «ПРОТИВНИК-ГЕ» відносять: контроль простору, визначення координат (азимут, дальність, висота), швидкості і траєкторії польоту повітряних цілей на великих дальностях та висотах з максимальною роздільною здатністю, навіть за умови інтенсивної радіопротидії та при роботі в складі АСУ ППО і системі УПР. Така РЛС є незамінною серед засобів швидкого реагування.

Технічними особливостями РЛС «ПРОТИВНИК-ГЕ» є:

- ФАР з цифровим перетворенням сигналу прийнятого сигналу;
- цифрова просторово-часова обробка сигналів;
- наднизький рівень бічних пелюстків і фону ДНА;
- гнучка адаптація системи обробки сигналів до завад і технічного стану станції;
- висока точність вимірювання кута місця і висоти, зокрема, на малих кутах місця;

- високоефективна цифрова система слідкування, що забезпечує стійку проводку повітряних об'єктів в інтенсивних гідрометеоутвореннях і навмисних пасивних перешкодах;
- адаптивне придушення бічних пелюсток ДНА;
- комплектація вторинним радіолокатором УВД.

Технічні характеристики РЛС «ПРОТИВНИК-ГЕ» наведені в табл. 1.2.[2]

Табл.1.2 — Технічні характеристики РЛС «ПРОТИВНИК-ГЕ»

Діапазон	L
Дальність виявлення повітряних цілей (ЕОП = 1.5 м ²), км	340
Кількість цілей, що супроводжуються	до 150
Кількість класів розпізнаваних цілей	8
Передавач: пікова потужність, кВт	500
середня потужність, кВт	12
Приймач: коефіцієнт шуму, дБ	3
Темп видачі даних, с	10 и 5

До принципово іншого класу систем радіолокації відносять пасивні системи. Разом з винайденням протирадіолокаційних ракет і високоточної зброї знизилась безпечність використання активних радіолокаційних станцій. За таких умов розробники зброї були змушені шукати нові способи підвищення ефективності деяких засобів і групувань протиповітряної оборони.

Розробка та активне використання технології «Стелс», гіперзвукових засобів повітряного нападу і технологій масованого застосування завад призвели до підвищення вимог до якості цілевказівки. Насамперед зросла необхідність впровадження високого темпу огляду, завадозахищеності, точності ха-

рактистик і якості розпізнавання. Зважаючи на особливості роботи традиційні активні РЛС, такі завдання є нездійсненими.

Перші приклади бойові використання пасивних систем виявлення зводились до застосування пеленгаційних каналів РЛС з подальшою обробкою інформації, отриманої від різних РЛС, на пункті обробки. Такий спосіб було названо тріангуляцією. До недоліків тріангуляційного способу відносять малу точність вимірювання координат та численні похибки перетинів при пеленгації кількох цілей.

На сьогодні є недостатньо відомостей про застосування тріангуляційного методу за кордоном. Відомо тільки те, що однобазова тріангуляційна система з базою порядку 100 км була узгоджена на озброєння у Англії 1969 року. Двобазова тріангуляційна система з базою порядку 40 км розроблялась у 1970-ті рр. у США. Є свідчення про розробку подібних систем у Німеччині.

Наразі кутомірний метод застосовується у розробках станцій радіотехнічної розвідки (СРР). Яскравим прикладом є українська станція радіотехнічної розвідки «КОЛЬЧУГА-М», зовнішній вигляд якої наведений на рис 1.3.



Рис. 1.3 — СРР «КОЛЬЧУГА-М»

Станція забезпечує виявлення, аналіз сигналів з імпульсним і неперервним випромінюванням та розпізнавання майже усіх джерел радіовипромінювання, встановлених на наземних, надводних і повітряних носіях і можливість раннього попередження систем ППО. Технічні характеристики СРР «КОЛЬЧУГА-М» наведені у табл. 1.3[3]

Табл.1.3— СРР «КОЛЬЧУГА-М»

Кількість станцій	3-4
Дальність виявлення повітряних цілей, км	800
Дальність виявлення наземних/надводних цілей, км	600
Чутливість антен, дБ/Вт	90-110
Робочий діапазон, МГц	130-18000
Кількість цілей, що супроводжуються	200
Секторний діапазон сканування, градуси	30-240
Помилка на пеленг, градуси	0.3-5
Діапазон вимірювання імпульсів за тривалістю, мкс	0.5-31.25 мкс
Діапазон вимірювання імпульсів по проходженню, мкс	2-79999 мкс
Помилка по вимірювальним діапазонам, мкс	<0.1 мкс
Помилка по частоті, МГц	±11 МГц

Додатковим прикладом СРР є «ОРІОН». Станція визначає просторові координати повітряних, наземних і морських об'єктів, здійснює їх класифікацію без випромінювання електромагнітної енергії, використовуючи електромагнітне випромінювання самих об'єктів.

Станція радіотехнічної розвідки «ОРІОН» (рис. 1.4) призначена для виявлення і вимірювання параметрів сигналів джерел радіовипромінювання. Вона дозволяє визначити їх просторові координати та кутове супроводження

за двома координатами у зоні розвід доступності; До її функцій відносять визначення класу носія ДРВ за результатами розпізнавання їх сигналів.

Використовуючи станції РТР «ОРІОН» було розроблено кутомірний (триангуляційний) комплекс «ВЕГА».

До його задач відносять:

- виявлення та вимірювання параметрів ДРВ повітряних цілей та інших ДРВ;
- визначення кутових координат цілей за випромінюванням їх бортових радіоелектронних засобів;
- супроводження і розпізнавання ДРВ, визначення типів їх носіїв;
- контроль роботи наземних радіоелектронних засобів та виявлення джерел завад;
- видача споживачам інформації про кутові координати цілей та результати їх розпізнавання, про стан завад;
- контроль радіоелектронного становища в районах випробувальних полігонів, промислових центрів, морських баз та аеропортів.



Рис. 1.4 — СРР «ОРІОН»

- видача споживачам інформації про кутові координати цілей та результати їх розпізнавання, про стан завад;
- контроль радіоелектронного становища в районах випробувальних полігонів, промислових центрів, морських баз та аеропортів.

Технічні характеристики РТР «ОРІОН» наведені у табл. 1.3[4]

Табл.1.3— Технічні характеристики станції РТР «ОРІОН»

Робочий діапазон частот	від 1,0 до 18,0 ГГц
Просторовий сектор в азимутальній площині	від 0 до 360°
Просторовий сектор в площині кута місця	від 0 до 20°
Дальність виявлення надгоризонтних цілей на висоті	10000 м
Дальність виявлення надгоризонтних цілей на дальності	400 км
Смуга миттєвого огляду	500 МГц
Точність пеленгування по азимуту	0,3°
Точність вимірювання частоти ДВ	2,5°
Точність вимірювання тривалості імпульсів	від 0,1 до 1,0 мкс
Максимальна кількість цілей, що одночасно видаються зовнішньому споживачу інформації	до 50
Ємність каталогу розпізнавання ДВ	до 1000
Мінімальний період огляду по азимуту	2 с
Період оновлення інформації	до 10 с
Кількість транспортних одиниць	1 шт.
Напруга живлення станції	380 В

Таким чином, системи активної локації активно розроблюються та використовуються через відносну простоту конструкції та експлуатації. До їх переваг можна віднести високу точність вимірювань, до недоліків високу потужність, та легкість виявлення. У той самий час пасивні засоби радіомоніто-

рингу перевершують активні засоби, передусім у своїй прихованості. Проте точність визначення координат пасивних систем радіолокації значно поступаються аналогічним характеристикам активних систем. Зважаючи на вагомі похибки (10% і вище) вимірювання координат ДРВ комплексами пасивного радіомоніторингу, завдання підвищення точності їх роботи залишається актуальним до сьогодні.

Отже, аналізуючи особливості роботи систем як пасивного, так і активного радіомоніторингу, необхідним вбачається науково-практичне завдання інтеграції роботи систем обох типів як єдиного цілого. Тому покращення точності оцінювання параметрів руху цілі за даними активної та пасивної радіолокаційних систем шляхом розробки алгоритмів вторинної і третинної обробки інформації є актуальною науковою задачею.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ЦІЛІВ АКТИВНИХ ТА ПАСИВНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

2.1 Методи активної радіолокації

Носіями РЛП в системах активної локації є вторинні сигнали, що були прийняті антенною РЛС в результаті вторинного випромінювання, перевипромінювання, або власного випромінювання радіохвиль ціллю.

Активну радіолокацію поділяють на 2 види[5]:

- з пасивною відповіддю;
- з активною відповіддю.

Активна радіолокація з пасивною відповіддю заснована на використанні ефекту вторинного випромінювання (відбиття) радіохвиль. Її активний характер полягає в опроміненні цілі потужними зондувальними сигналами. Особливості вторинного випромінювання істотно впливають на характер цього методу радіолокації. На активну радіолокацію з пасивним відповіддю істотно впливає також і характер розміщення приймальної і передавальної апаратури на позиції. Якщо приймальна позиція поєднана з передавальною, активу РЛС називають суміщеною (рис. 2.1, а). Суміщена РЛС часто містить одну антену, що комутується по черзі на передачу і прийом. Можливий рознос приймальної і передавальної позицій на відстань d називається базою станції. База може бути не тільки постійною (рис. 2.1, б), але і змінною (рис. 2.1, в). Приймальний пункт, наприклад, головка самонаведення розташовується на ракеті, тому база постійно змінюється.

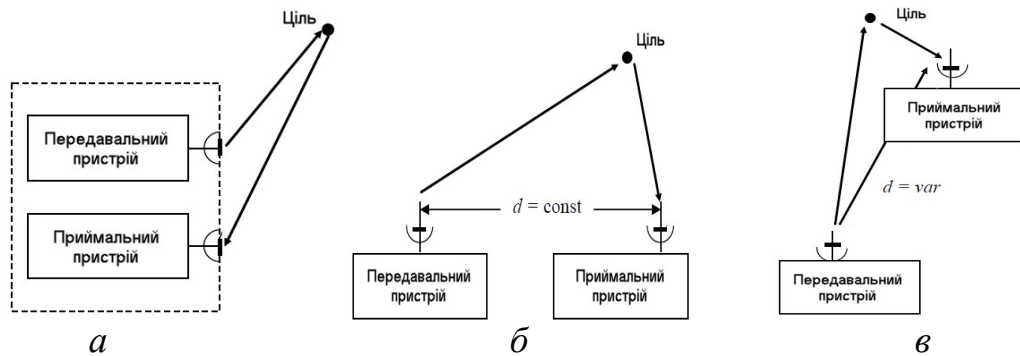


Рис. 2.1— Суміщена активна РЛС (а), рознесена РЛС з постійною базою(б), рознесена РЛС зі змінною базою(в)

Активна радіолокація з активною відповіддю дозволяє отримувати надійну інформацію про свої об'єкти, наприклад, про кораблі або літаки. Для цього їх опромінюють запитними (зондувальними) сигналами. На об'єктах встановлюють відповідачі – приймально-передавальні пристрої, що реалізують перевипромінювання прийнятих сигналів. Несучі частоти, закони модуляції (коди) запитувача (РЛС) і відповідача (ціль) можуть змінюватися в широкіх межах. Це забезпечує розпізнання державної приналежності об'єктів («свій - чужий») і індивідуальне упізнання.

Важливе значення для активних РЛС має характер зондування простору. Висока спрямованість зонduючого випромінювання забезпечує концентрацію його енергії, полегшуючи подальше виділення відбитих сигналів. Через це зондування різних ділянок простору часто проводиться неодноразово, тобто зазвичай реалізується послідовний огляд. Оскільки коливання, які випромінюються в кожному напрямку, зазвичай модульовані у часі, закони модуляції для різних напрямків не збігаються. У цьому випадку має місце просторово-часова модуляція зонduючих коливань. Вона досягається шляхом часової модуляції в передавачі і переміщення діаграми спрямованості передавальних антен в просторі. Можливі види просторово-часової модуляції забезпечують послідовний огляд простору по жорсткій програмі або по гнучкій - в залеж-

ності від результатів поточних спостережень. Для підвищення оперативності огляду використовують антени з електронним управлінням становищем променя типу ФАР.

В ідеальному випадку вважається, що зонduючий і відбитий імпульс поширюються по прямолінійних траєкторіях без спотворення своєї форми. Час затримки t_3 зонduючого імпульсу, відбитого від точкових цілей сигналів, визначаються для рознесених (рис. 2.1 б,в) і суміщених (рис. 2.1 а) РЛС за наступними формулами

$$t_3 = \frac{D_1 + D_2}{c}; \quad (2.1)$$

$$t_3 = \frac{2D}{c}, \quad (2.2)$$

де c - швидкість поширення радіохвиль (швидкість світла)

Дальність до цілі кодується тим самим в часовій структурі прийнятих сигналів.

Обертаючи діаграму направленості (скануючи), можна порівняно просто вимірювати кутові координати - азимут і кути місця цілей, наприклад, по максимуму відбитого сигналу, забезпечувати їх кутове розділення. Інформація про різні кутові напрямки при одноканальному прийомі надходить послідовно в часі, при багатоканальному її можна отримувати паралельно, практично одночасно.

Структурна схема сучасної РЛС представлена на рис. 2.2. До складу РЛС входять:

- ФАР;
- синтезатор-синхронізатор;
- аналоговий процесор (приймач);
- цифровий процесор;
- пристрій обробки радіолокаційної інформації;

На вхід приймача РЛС інформація поступає у вигляді аналогового сигналу з великою кількістю шумів і завад. Для виділення корисного сигналу на фоні завад, шумів, віддзеркалень від місцевих предметів тощо використовується комп'ютеризована обробка сигналу, яка ділиться на первинну, вторинну і третинну. Під первинною обробкою розуміється обробка сигналів, що прийшли в межах одного огляду. До неї відноситься перетворення аналогового сигналу в цифровий, виділення корисного сигналу на тлі перешкод, отримання формалізованих повідомлень про ціль, сортування цілей.

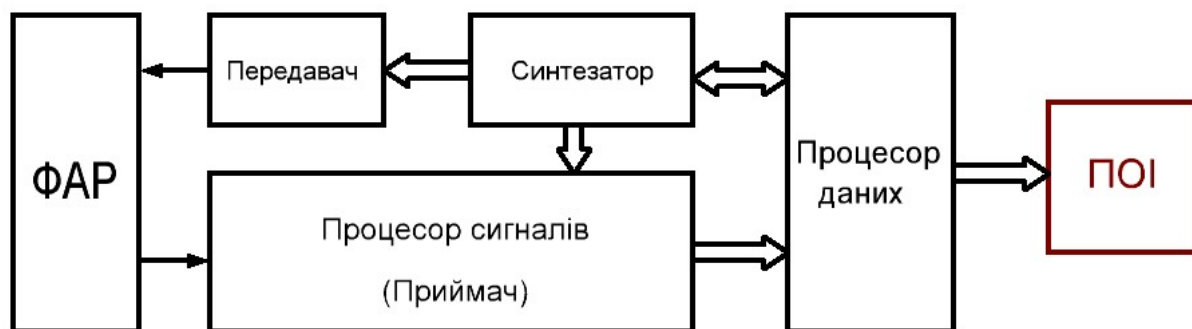


Рис 2.2 — Структурна схема сучасної РЛС.

2.2 Методи пасивної радіолокації

Відомо, що перші в історії спроби бойового використання пасивних систем виявлення зводились до використання пеленгаційних каналів РЛС з подальшим об'єднанням інформації від різних РЛС на пункті обробки. Такий метод називають тріангуляцією. Принцип роботи тріангуляції досить простий та полягає у тому, щоб напрямком на ДРВ визначався з різних точок простору, а потім по відомих кутах і відстанях між РЛС розраховувалась дальність до об'єкта (рис. 2.3).

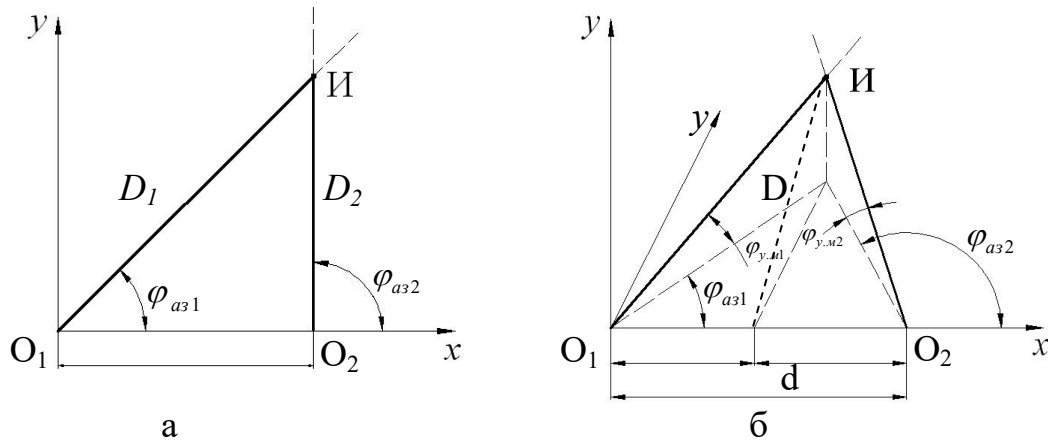


Рис. 2.3 — Тріангуляційний метод визначення місця розташування ДРВ на площині (а), у просторі (б).

За умови якщо джерело радіовипромінювання (ДРВ) знаходиться в горизонтальній або вертикальній площині, то задля того, щоб визначити його місце розташування достатньо виміряти два азимутальних кута: φ_{az1} та φ_{az2} або два кути місця: $\varphi_{y.m1}$ і $\varphi_{y.m2}$. Місце розташування джерела випромінювання визначається точкою перетину O_1I та O_2I (двох ліній положення).

Для визначення місця розташування джерела в просторі вимірюються кути азимута φ_{az1} і φ_{az2} у двох рознесених точках O_1 і O_2 або кут місця в одній з цих точок. Ще одним варіантом є знаходження кутів місця $\varphi_{y.m1}$ і $\varphi_{y.m2}$ у двох точках прийому і кут азимуту в одній з них (рис. 2.3, б).

За допомогою нескладних розрахунків вимірних пеленгаційних кутів та застосування теореми синусів, можна показати, що дальності з точок прийому до ДРВ на площині визначаються по формулам

$$D_1 = \frac{d \sin(180 - \varphi_{a32})}{\sin(\varphi_{a32} - \varphi_{a31})}; \quad (2.1)$$

$$D_2 = \frac{d \sin(\varphi_{a31})}{\sin(\varphi_{a32} - \varphi_{a31})}; \quad (2.2)$$

а у просторі

$$D = \frac{d}{\cos(\varphi_{ym1})(\cos(\varphi_{a31}) - \sin(\varphi_{a31}) \operatorname{ctg}(\varphi_{a32}))}; \quad (2.3)$$

Перевага триангуляційного методу полягає в простоті його технічної реалізації. Саме тому він широко застосовується при веденні РР і РТР.

Вагомим недоліком цього методу вважають хибні виявлення неіснуючих джерел за умови наявності великої кількості випромінюючих об'єктів в зоні дії пеленгатора (рис. 2.4). З малюнка видно, що визначені координати трьох істинних джерел D_1, D_2, D_3 , але простежується і 6 хибних: $ХД_1, ХД_2, \dots, ХД_6$.

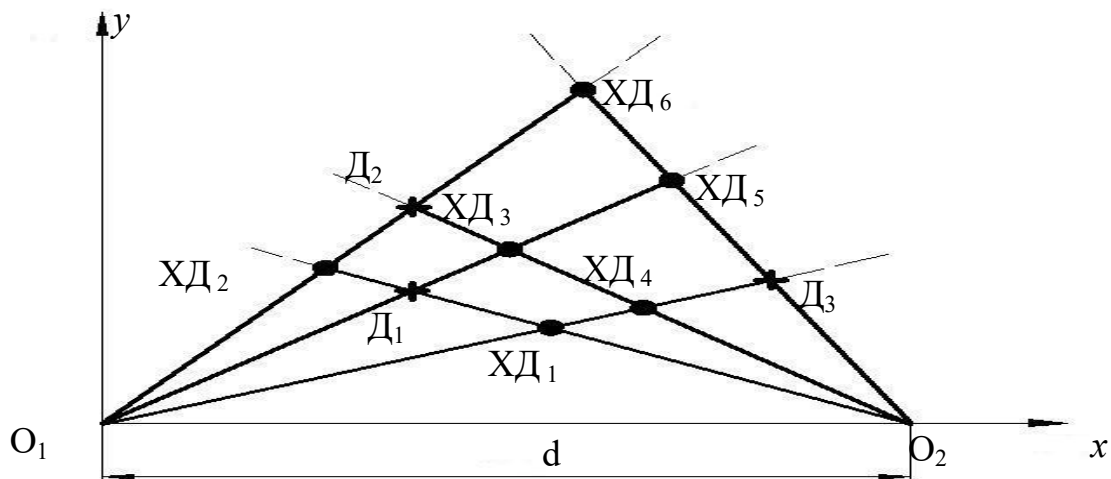


Рис.2.4 — Хибні виявлення при використанні триангуляційного методу.

Недоліки триангуляційного методу є настільки вагомими, що вони унеможливають його практичне застосування. Основними причинами таких недоліків є:

- низька точність вимірювання координат;
- наявність великого числа хибних перетинів при пеленгації декількох випромінюючих цілей.

Точність пеленгації визначається шириною променя антени РЛС сукупно з відношенням С/Ш. Зазвичай ширина променя в існуючих РЛС досягає величини $0,25 - 0,5^\circ$. Така величина пеленгаційної похибки може призвести до вагомих похибок в обчисленнях дальності тріангуляційним методом. Необхідно зазначити той факт, що тріангуляційний метод працює з безперервним випромінюванням. Окрім цього, пеленгаційний канал РЛС може виявити пеленг тільки в робочій смузі частот станції. Тобто поза цією смугою випромінювання не може бути зафіксованим. Як наслідок перевідбиття від місцевих предметів нижня границя виявлення, в залежності від довжини бази (відстані між пеленгаторами), досягає 200-4000 м.

Незважаючи на те, що тріангуляційні алгоритми були реалізовані на командних пунктах радіотехнічних військ, коректно вони функціонували тільки при роботі з поодинокими цілями на відстані між пеленгаторами близько 120-200 км. Ці алгоритми майже не задіяні на практиці оскільки вони не можуть забезпечити точність і роздільну здатність, достатні для цілевказівки, таку як активні засоби ППО. Наявні недоліки тріангуляційного методу призвели до пошуку інших способів виявлення і вимірювання координат об'єктів, що випромінюють.

Найбільшого поширення серед пасивних систем моніторингу набув різницево-далекомірний метод. Він базується на вимірюванні різниці приходу сигналів до різних приймальних позицій. Цей метод дозволяє працювати як з імпульсними, так і за безперервними сигналами, а також з шумовими та шумоподібними сигналами. У разі, коли для обчислення різниці приходу застосовується базово-кореляційна обробка, такий метод вважається найдоцільні-

шим. При використанні базово-кореляційної обробки вид прийнятих сигналів не відіграє важливої ролі.

Головна відмінність різницево-далекомірного методу від триангуляції полягає в синхронному прийомі сигналів від випромінюючого джерела на рознесених позиціях. Координати джерела визначаються з різниці сигналів, що надійшли на кожну з позицій. Що стосується різниці надходження сигналу до однієї позиції щодо іншої, то вона розраховується з положення максимуму взаємно-кореляційної функції сигналів від цих позицій або різниці приходу імпульсу до приймальних пунктів (рис. 2.3).

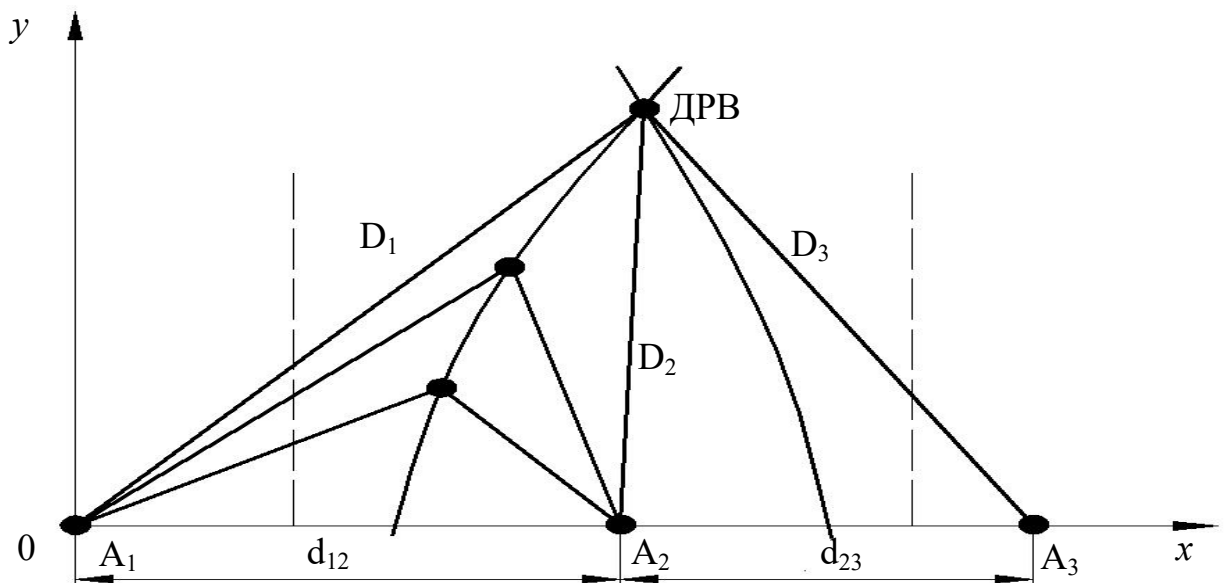


Рис. 2.5 — Різницево-далекомірний спосіб визначення місця розташування ДРВ.

Задля того, щоб знайти координати ДРВ необхідно мати три рознесені в просторі точки спостереження (прийому): A_1 , A_2 , A_3 , які належать різним базам A_1A_2 і A_2A_3 . Фокуси гіпербол у такому разі збігаються з точками спостереження. Різниці відстаней $d_{12} = D_1 - D_2$ та $d_{23} = D_2 - D_3$ є параметрами гіпербол. За допомогою цих параметрів здійснюється їх побудова. Просторове положення ДРВ може бути визначеним з врахуванням трьох різниць дальностей, які вимірюється в трьох-чотирьох приймальних пунктах. Положення

джерела є точкою перетину трьох гіперболоїдів обертання. За умови використання цього методу, точність визначення місця розташування ДРВ є досить високою, а похибки становлять близько десятків метрів. Такий метод застосовується в пасивних імпульсних (часових) і кореляційно-базових системах визначення положення ДРВ.

Виявлення помилкових неіснуючих ДРВ можливе навіть коли використовуються пасивні різницево-далекомірних системи. Зазвичай, це відбувається у тих випадках, коли джерело випромінює періодичні сигнали з малим періодом (з малою шпаруватістю). Отже, система розраховує велику кількість різниць дальностей і визначає велику кількість гіперболічних поверхонь. Проте варто пам'ятати, що деякі з них є хибними.

3 АНАЛІЗ ЗАДАЧ ВТОРИННОЇ ТА ТРЕТИННОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Процес отримання даних про об'єкти, що знаходяться в зоні видимості РЛС називають обробкою радіолокаційної інформації (РЛІ). Така обробка дозволяє отримати інформацію про координати цілі, параметри її траєкторії, час локації тощо. Сукупність отриманих даних умовно називають відміткою. Сигнали, що несуть необхідну для оператора інформацію називають корисними, але на них зазвичай накладаються завади різної природи, що спотворюють інформацію. У зв'язку з цим в процесі обробки виникають задачі виокремлення корисних сигналів та отримання необхідних даних в умовах завад.

Обробка інформації ґрунтується на існуванні відмінностей між корисним сигналом та завадою. Весь процес обробки РЛІ можна розділити на 3 основних етапи: первинна, вторинна та третинна обробка.

На етапі первинної обробки РЛІ ціль виявляють та визначають її координати. Первинна обробка здійснюється за одною, або кількома суміжними розгортками дальності. Цього вистачає для виявлення цілі та визначення координат. Таким чином первинною обробкою РЛІ називають обробку інформації за один період огляду РЛС. До складу первинної обробки РЛІ відносять:

- виявлення корисного сигналу в шумах;
- визначення координат цілі;
- кодування координат цілі.

3.1 Вторинна обробка РЛІ

Одинична відмітка від цілі лише наближено відображає істинне положення цілі в момент локації. За нею не можна прийняти достовірного рішення про виявлення цілі і визначити параметри її руху. У зв'язку з цим очевид-

но, що первинна обробка не дає вичерпної інформації про цілі, що знаходяться в зоні огляду РЛС. Для прийняття правильного рішення про наявність цілі і щоб визначити параметри її руху, необхідно проаналізувати інформацію, що була отримана за декілька періодів огляду. Автоматична або напівавтоматична обробка інформації, що була отримана за кілька періодів огляду РЛС задля виявлення та безперервного супроводження цілей, називається вторинною обробкою РЛП.

До вторинної обробки відносять наступні операції:

- визначення параметрів цілі(курс, швидкість, прискорення тощо) за даними, що отримані за кілька оглядів РЛС;
- виокремлення деякої області простору, в якій з певною вірогідністю очікується надходження відмітки при наступному огляді(екстраполяція, прогноз відміток);
- об'єднання спрогнозованих координат з тими, що були отримані на поточному кроці, та прив'язка нової відмітки до траєкторії (оновлення траєкторії);

Основними даними, що визначають траєкторію руху цілі, є просторові координати відміток цілі, зміна яких відповідає закону руху цілі в просторі. Траєкторія руху цілі залежить від багатьох факторів і умов, таких як тип цілі, висота польоту, швидкість, можливості маневрування тощо. Також на траєкторію польоту цілі впливає рід випадкових факторів, під якими розуміють всі причини, що викривляють траєкторію або ускладнюють її відтворення. Таким чином рух цілі необхідно віднести до категорії процесів, що випадково змінюють свої параметри у часі. Зрозуміло, що для статистичного опису таких процесів необхідно знати закони розподілу ймовірностей параметрів, що визначають цей процес. На практиці такі закони отримати неможливо, тому необхідно використовувати деякі гіпотези про статистичні характерис-

тики цих сигналів, тобто відштовхуватись від відносно достовірної моделі руху цілі.

3.2 Третинна обробка РЛ

Системи моніторингу, окрім задачі обробки інформації, що надходить від одної РЛС, вирішують задачу, що пов'язана з об'єднанням інформації про цілі, що надходять від кількох РЛС і створенням загальної картини повітряної обстановки. Оброку РЛП, що надходить від кількох джерел називають третинною обробкою інформації.

Через те, що зазвичай зони огляду РЛС перекриваються, інформація про одну ціль може одночасно надходити з кількох станій. У ідеальному випадку відмітки повинні співпадати, але на практиці така ситуація неможлива, оскільки на точність даних впливають систематичні та випадкові помилки вимірювання координат, різний час локації, а також помилки при перерахунку координат між точками знаходження джерела та приймача інформації.

Основними задачами третинної обробки інформації є рішення про кількість цілей, що дійсно знаходяться у спільній зоні огляду всіх РЛС та уточнення виміряних координат цілей. Для вирішення цих задач необхідно виконати наступні операції:

- провести збір даних від усіх джерел інформації;
- привести відмітки до єдиної системи координат та спільного часу;
- встановити приналежність відміток до конкретних цілей;
- провести об'єднання інформації;

Для вирішення цих задач використовуються всі характеристики цілей. Пристрої третинної обробки реалізуються на спеціалізованих обчислювальних системах з повною автоматизацією всіх операцій. Третинна обробка є фінальним етапом визначення інформації про повітряну обстановку.

4 ТРАЄКТОРНА ФІЛЬТРАЦІЯ ПРИ ВТОРИННІЙ ОБРОБЦІ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ДАНИМИ РЛС І РДС

4.1 Алгоритм калманівської фільтрації

В роботі в якості основного засобу траєкторної фільтрації при вторинній обробці РЛІ використовується фільтр Калмана[6]. Він був запропонований у 1960 році і є оптимальним фільтром за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки оцінки.

Розглянемо динамічну систему (ДС), що задається наступними рівняннями стану(4.1) та спостережень(4.2)[7]:

$$x(k+1) = F(k+1, k)x(k) + G(k+1, k)w(k); \quad (4.1)$$

$$y(k) = H(k)x(k) + v(k), \quad (4.2)$$

де $x(k)$ - вектор стану динамічної системи; $y(k)$ – вектор вимірювання; $w(k)$ - шум збудження з кореляційною матрицею $Q(k)$; $v(k)$ - шуми вимірювання з кореляційною матрицею $R(k)$.

Початковий вектор стану $x(0)$ є гаусовським вектором з нульовим середнім значенням та кореляційною матрицею $P(0)$. Шуми збудження $w(k)$ та шуми вимірювання вважаються некорельованими, тобто $E\{w(k)v^T(k)\} = 0$ для всіх k та i .

Задача фільтрації полягає в тому, щоб за послідовністю вимірювань $\{y(1), y(2) \dots y(k)\} = Y_1^k$ знайти оптимальну оцінку вектору стану $x(k)$, що задовольняє критерію мінімуму середньоквадратичної похибки. Позначимо цю оцінку як $\hat{x}(k|k)$, а похибку оцінки як $\tilde{x}(k|k) = x(k) - \hat{x}(k|k)$.

З точки зору теорії оцінювання вважається, що оцінка вектору стану, що задовольняє вищезазначеній умові, є умовним середнім.

$$\hat{x}(k|k) = E\{x(k)|Y_1^k\} \quad (4.3)$$

Отже, для її знаходження необхідно знайти апостеріорну щільність розподілу $f[x(k)|Y_1^k]$. Цю щільність можна отримати безпосередньо, використовуючи формулу Баєса:

$$f[x(k)|Y_1^k] = f[x(k)|Y_1^k, y(k)] = \frac{f[x(k)|Y_1^{k-1}] \cdot f[y(k)|x(k), Y_1^{k-1}]}{f[y(k)|Y_1^{k-1}]} \quad (4.4)$$

Перш за все, зазначимо, що $f[y(k)|x(k), Y_1^{k-1}] = f[y(k)|x(k)]$, оскільки $v(k)$ – білий гаусівський шум та, відповідно, при фіксованому значенні $x(k)$ вектор $y(k)$ не залежить від послідовності попередніх вимірювань Y_1^{k-1} . З рівняння спостереження безпосередньо випливає, що

$$f[y(k)|x(k)] = N\{H(k)x(k), R(k)\}, \quad (4.5)$$

де $R(k)$ – кореляційна матриця помилки вимірювання, а $N\{\mathbf{a}, \mathbf{b}\}$ використовується для запису гаусівської щільності ймовірності з вектором середнього \mathbf{a} та кореляційною матрицею \mathbf{b} .

Для знаходження параметрів умовної щільності $f[x(k)|Y_1^{k-1}]$, що входить до чисельника виразу, що розглядається (4.4), введемо наступні позначення:

$$E\{x(k)|Y_1^{k-1}\} = \hat{x}(k|k-1), \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} E\{[x(k) - \hat{x}(k|k-1)][x(k) - \hat{x}(k|k-1)]^T | Y_1^{k-1}\} \\ = E\{\tilde{x}(k|k-1)\tilde{x}^T(k|k-1) | Y_1^{k-1}\} = P(k|k-1) \end{aligned} \quad (4.7)$$

За фізичним змістом величина $\hat{x}(k|k-1)$ є оцінкою екстраполяції (прогнозу) на один крок вперед, а $P(k|k-1)$ – кореляційну матрицю помилок екстраполяції.

Підставляючи у вищезазначені рівняння $x(k)$ з рівняння стану отримаємо:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k|k-1) &= E\{F(k, k-1)x(k-1) + G(k, k-1)w(k-1)|Y_1^{k-1}\} = \\ &= F(k, k-1)E\{x(k-1)|Y_1^{k-1}\} = F(k, k-1)\hat{x}(k-1|k-1),\end{aligned}\quad (4.8)$$

$$\begin{aligned}P(k|k-1) &= E\{\tilde{x}(k|k-1)\tilde{x}^T(k|k-1)|Y_1^{k-1}\} \\ &= F(k, k-1)P(k-1|k-1)F^T(k, k-1) \\ &\quad + G(k, k-1)Q(k-1)G^T(k, k-1),\end{aligned}\quad (4.9)$$

де $P(k-1|k-1) = E\{\tilde{x}(k-1|k-1)\tilde{x}^T(k-1|k-1)|Y_1^{k-1}\}$ – кореляційна матриця помилок фільтрації на попередньому кроці.

При виводі рівнянь вважається рівним нулю середнє значення вектору шумів збудження $w(k)$, а також відсутня кореляція між цим вектором та вектором стану $x(k)$. Таким чином,

$$f[x(k)|Y_1^{k-1}] = N\{\hat{x}(k|k-1), F(k, k-1)P(k-1|k-1)F^T(k, k-1) + G(k, k-1)Q(k-1)G^T(k, k-1)\}. \quad (4.10)$$

Визначимо параметри гаусівської щільності $f[y(k)|Y_1^{k-1}]$. Використовуючи рівняння спостереження та приймаючи до уваги відсутність кореляції між вектором стану $x(k)$ та шумом спостереження $v(k)$, отримаємо:

$$E\{y(k)|Y_1^{k-1}\} = E\{H(k)x(k) + v(k)|Y_1^{k-1}\} = H(k)\hat{x}(k|k-1), \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned}E\{[y(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1)][y(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1)]^T\} &= \\ E\{\tilde{z}(k|k-1)\tilde{z}^T(k|k-1)\} &= P_{\tilde{z}}(k) = H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k),\end{aligned}\quad (4.12)$$

де $\tilde{z}(k|k-1) = y(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1)$.

В теорії калманівської фільтрації величину $\tilde{z}(k|k-1)$ називають «оновлюючим процесом». Таким чином,

$$f[y(k)|Y_1^{k-1}] = N\{H(k)\hat{x}(k|k-1), H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)\}, \quad (4.13)$$

Отже, підставляючи отримані величини (4.10) та (4.13) в формулу (4.4) для знаходження апостеріорної щільності ймовірності $f[x(k)|Y_1^k]$, можна показати, що ця щільність є гаусовським вектором середніх $\hat{x}(k|k)$, що є оцінкою фільтрації вектора стану, яка визначається рекурентно.

Таким чином, оптимальний алгоритм оцінювання вектору стану описується системою рекурентних рівнянь наступного вигляду:

Рівняння оцінки

$$\hat{x}(k|k) = F(k, k-1)\hat{x}(k-1|k-1) + K(k)[y(k) - H(k)F(k, k-1)\hat{x}(k-1|k-1)] = \hat{x}(k|k-1) + K(k)\tilde{z}(k|k-1), \quad (4.14)$$

де $K(k)$ - коефіцієнт оптимального фільтра:

$$K(k) = P(k|k)H^T(k)R^{-1}(k) = P(k|k-1)H^T(k) \times [H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1}, \quad (4.15)$$

Кореляційна матриця помилок оцінки

$$P(k|k) = P(k|k-1) - P(k|k-1)H^T(k) \times [H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1}H(k)P(k|k-1), \quad (4.17)$$

Кореляційна матриця помилок екстраполяції

$$P(k|k-1) = F(k, k-1)P(k-1|k-1)F^T(k, k-1) + G(k, k-1)Q(k-1)G^T(k, k-1), \quad (4.18)$$

Початкові умови

$$\hat{x}(0|0) = \bar{x}(0), P(0|0) = P(0)$$

Оптимальний фільтр, алгоритм якого заснований на описаних вище рівняннях називають фільтром Калмана. Часова діаграма, що ілюструє механізм оцінки в фільтрі Калмана наведена на рис 4.1.

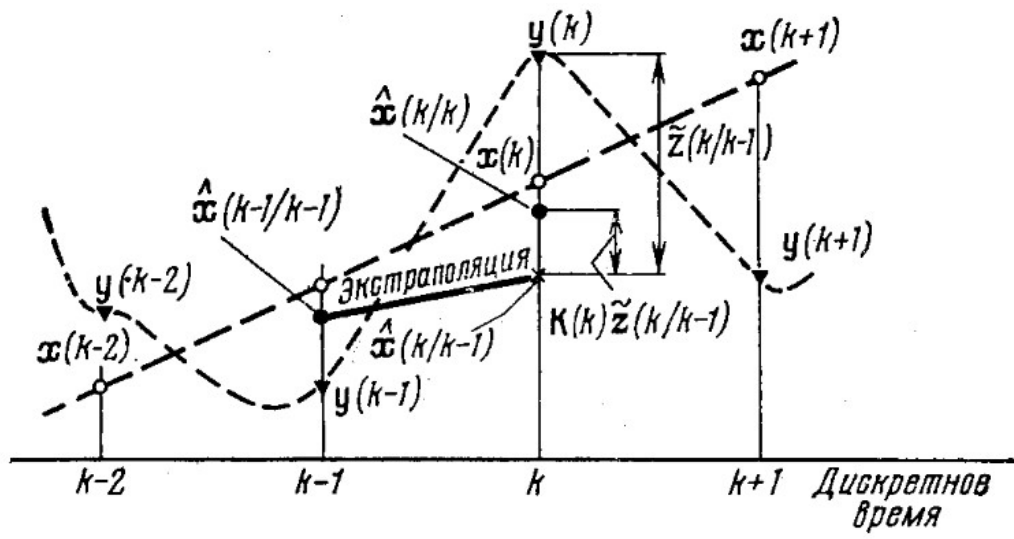


Рис 4.1 — Часова діаграма процесу роботи фільтра Калмана.

4.2 Траєкторна фільтрація за даними РЛС

4.2.1 Алгоритм траєкторної фільтрації за даними РЛС

Рух цілі в декартовій системі координат, описується за допомогою моделі руху другого порядку, описується рівнянням (4.1)

$$u(k) = F(k, k-1)u(k-1) + G(k)w(k), \quad (4.19)$$

де $u(k)^T = (x(k), \dot{x}(k), y(k), \dot{y}(k), z(k), \dot{z}(k))$ – вектор стану цілі, до складу якого входять координати положення $x(k), y(k), z(k)$ та швидкості зміни положення за відповідними осями декартової системи координат $\dot{x}(k), \dot{y}(k), \dot{z}(k)$;

$w(k)$ – шум збудження з кореляційною матрицею $Q(k) = \text{diag}(\sigma_{ax}^2, \sigma_{ay}^2, \sigma_{az}^2)$;

$$F(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad G(k) = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix}; \quad (4.20)$$

T – темп надходження даних.

Дисперсії прискорення переміщення цілі за кожною з осей визначаються за формулами:

$$\sigma_{ax}^2 = \frac{\sigma_{mx}^2}{3}; \sigma_{ay}^2 = \frac{\sigma_{my}^2}{3}; \sigma_{az}^2 = \frac{\sigma_{mz}^2}{3}, \quad (4.21)$$

де $\sigma_{mx}, \sigma_{my}, \sigma_{mz}$ – модуль максимального значення прискорення цілі за кожною з осей.

У моделі, що використовується, зміна параметрів руху цілі за кожною з осей прямокутної системи координат, описується ДС другого порядку, вектор стану якої містить координати положення та швидкості їх зміни.

Рівняння спостереження РЛС в декартовій системі координат є нелінійними та описуються наступними виразами:

$$\begin{aligned}x_{\text{И}}(k) &= r_{\text{И}}(k) \cdot \cos(\varepsilon_{\text{И}}(k)) \cdot \cos(\beta_{\text{И}}(k)); \\y_{\text{И}}(k) &= r_{\text{И}}(k) \cdot \cos(\varepsilon_{\text{И}}(k)) \cdot \sin(\beta_{\text{И}}(k)); \\z_{\text{И}}(k) &= r_{\text{И}}(k) \cdot \sin(\varepsilon_{\text{И}}(k)),\end{aligned}\tag{4.22}$$

де $r_{\text{И}}(k)$, $\varepsilon_{\text{И}}(k)$, $\beta_{\text{И}}(k)$ – дальність, азимут та кут місця, що вимірює РЛС; $x_{\text{И}}(k)$, $y_{\text{И}}(k)$, $z_{\text{И}}(k)$ – перераховані в декартову систему координат координати цілі.

Зв'язок між координатами цілі у сферичній системи та прямокутній системах координат наведена на рис. 4.2

Після виконання лінеаризації рівняння спостереження РЛС в декартовій системі координат можна привести до наступного вигляду

$$u_{\text{И}}(k) = H(k)u(k) + v(k),\tag{4.23}$$

де $u_{\text{И}}(k) = (x_{\text{И}}(k), y_{\text{И}}(k), z_{\text{И}}(k))$ - вектор спостереження, що включає координати цілі в декартовій системі координат; $H(k)$ – матриця спостереження, що має вигляд:

$$H(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

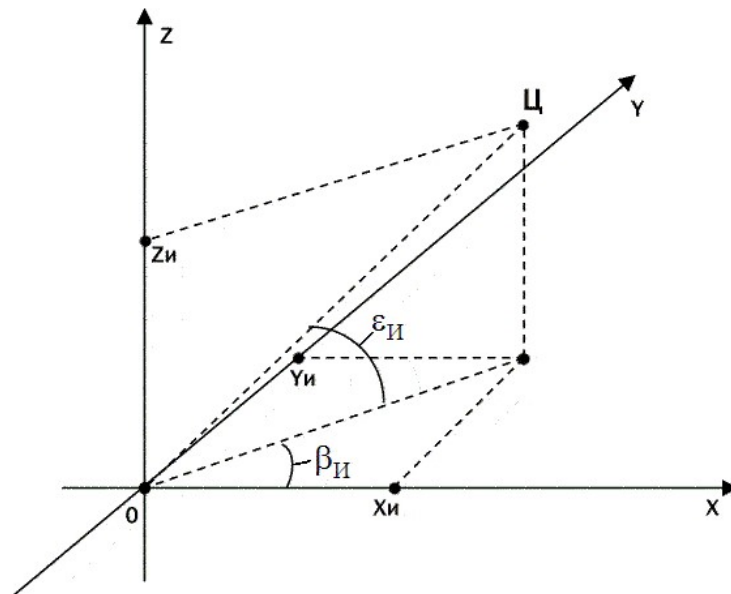


Рис 4.2— Зв'язок між координатами цілі в сферичній і прямокутній системах координат

Кореляційна матриця помилок вимірювання РЛС у прямокутній системі координат $R(k)$ має вигляд:

$$R(k) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2(k) & \sigma_{xy}^2(k) & \sigma_{xz}^2(k) \\ \sigma_{xy}^2(k) & \sigma_y^2(k) & \sigma_{yz}^2(k) \\ \sigma_{xz}^2(k) & \sigma_{zy}^2(k) & \sigma_z^2(k) \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

При цьому її елементи визначаються за формулами:

$$\sigma_x^2(k) = \sigma_r^2 \cdot \cos^2(\varepsilon(k)) \cdot \cos^2(\beta(k)) + r^2(k) \cdot \sigma_\varepsilon^2 \cdot \cos^2(\beta(k)) \cdot \sin^2(\varepsilon(k)) + r^2(k) \cdot \sigma_\beta^2 \cdot \sin^2(\beta(k)) \cdot \cos^2(\varepsilon(k)); \quad (4.25)$$

$$\sigma_y^2(k) = \sigma_r^2 \cdot \cos^2(\varepsilon(k)) \cdot \sin^2(\beta(k)) + r^2(k) \cdot \sigma_\varepsilon^2 \cdot \sin^2(\beta(k)) \cdot \sin^2(\varepsilon(k)) + r^2(k) \cdot \sigma_\beta^2 \cdot \cos^2(\beta(k)) \cdot \cos^2(\varepsilon(k)); \quad (4.26)$$

$$\sigma_z^2(k) = \sigma_r^2 \cdot \sin^2(\varepsilon(k)) + \sigma_\varepsilon^2 r^2(k) \cos^2(\varepsilon(k)); \quad (4.27)$$

$$\sigma_{xy}^2(k) = 0.5 \cdot \sin(2\beta(k)) \cdot [\cos^2(\varepsilon(k)) \sigma_r^2 - r^2(k) \cdot \sigma_\beta^2 + \sin^2(\varepsilon(k)) \cdot r^2(k) \cdot \sigma_\varepsilon^2]; \quad (4.28)$$

$$\sigma_{xz}^2(k) = 0.5 \cdot \sin(2\varepsilon(k)) \cdot \sin(\beta(k)) \cdot (\sigma_r^2 - r^2(k) \cdot \sigma_\varepsilon^2); \quad (4.29)$$

$$\sigma_{yz}^2(k) = 0.5 \cdot \sin(2\varepsilon(k)) \cdot \cos(\beta(k)) \cdot (\sigma_r^2 - r^2(k) \cdot \sigma_\varepsilon^2), \quad (4.30)$$

де σ_r^2 , σ_β^2 , σ_ε^2 – дисперсії помилок вимірювання координат цілі у сферичній системі координат;

$r(k)$, $\beta(k)$, $\varepsilon(k)$ – координати цілі в сферичній системі координат.

З виразів (4.25)... (4.30) зрозуміло, що компоненти кореляційної матриці помилок вимірювання $R(k)$ в декартовій системі координат залежать від поточного положення цілі $r(k)$, $\beta(k)$, $\varepsilon(k)$. Тому вони повинні визначатись на кожному кроці вимірювань k .

Дискретний фільтр Калмана, що синтезується за рівняннями з попереднього розділу описується рівняннями

$$u^*(k) = F(k, k-1)u(k-1); \quad (4.31)$$

$$\hat{u}(k) = u^*(k) + K(k)(u_{\text{и}}(k) - H(k)u^*(k)), \quad (4.32)$$

де $u^*(k)$, $\hat{u}(k)$ - вектори прогнозу та оцінки параметрів руху цілі в момент k ;

$K(k)$ – коефіцієнт підсилення фільтра Калмана, що визначається за рівнянням (4.15)

Фільтр Калмана, що використовується для траєкторної фільтрації є лінійним і нестационарним, оскільки компоненти кореляційної матриці помилок вимірювання $R(k)$ в декартовій системі координат залежать від поточного положення цілі $r(k)$, $\beta(k)$, $\varepsilon(k)$.

Для запуску дискретного фільтра Калмана необхідно задати початкові умови. При проведенні двох вимірювань в момент часу $k = 0$ та $k = 1$ вектор початкової оцінки має вигляд:

$$\hat{u}^T(k) = \left(x_{\text{и}}(1), \frac{x_{\text{и}}(1) - x_{\text{и}}(0)}{T}, y_{\text{и}}(1), \frac{y_{\text{и}}(1) - y_{\text{и}}(0)}{T}, z_{\text{и}}(1), \frac{z_{\text{и}}(1) - z_{\text{и}}(0)}{T} \right). \quad (4.33)$$

Кореляційна матриці помилок початкової оцінки $\hat{P}(1)$ визначається так:

$\hat{P}(1)$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\sigma_x^2(1)}{T} & \frac{\sigma_x^2(1)}{T} & \frac{\sigma_{xy}^2(1)}{T} & \frac{\sigma_{xz}^2(1)}{T} \\ \frac{\sigma_x^2(1)}{T} & \frac{\sigma_x^2(1) + \sigma_x^2(0)}{T^2} + \sigma_{ax}^2 T^2 & \frac{\sigma_{xy}^2(1)}{T} & \frac{\sigma_{xz}^2(1)}{T} \\ \frac{\sigma_{xy}^2(1)}{T} & \frac{\sigma_{xy}^2(1) + \sigma_{xy}^2(0)}{T^2} & \frac{\sigma_y^2(1)}{T} & \frac{\sigma_{yz}^2(1)}{T} \\ \frac{\sigma_{xz}^2(1)}{T} & \frac{\sigma_{xz}^2(1) + \sigma_{xz}^2(0)}{T^2} & \frac{\sigma_{yz}^2(1)}{T} & \frac{\sigma_z^2(1)}{T} \end{bmatrix}$$

Кореляційна матриця $\hat{P}(1)$ є симетричною.

4.2.2 Аналіз алгоритму шляхом статистичного моделювання

Аналіз синтезованого алгоритму траєкторної фільтрації параметрів руху цілі виконано методом статистичного моделювання. Для моделювання руху цілі використовувалась модель (4.19). На кожній ітерації статистичного моделювання генерувалася випадкова траєкторія цілі з малою маневреністю з параметрами $\sigma_{ax} = 1\text{ м/с}^2$, $\sigma_{ay} = 1\text{ м/с}^2$. Протягом всього часу моделювання ціль не змінює висоту, отже $\sigma_{az} = 0\text{ м/с}^2$. Помилка вимірювання РЛС $\sigma_r = 300\text{ м}$, $\sigma_\varepsilon = 0.16$ град, $\sigma_\beta = 0.16$ град, а темп надходження даних $T = 1\text{ с}$. Моделювання проводилося 100 разів. Протягом кожного моделювання положення цілі вимірюється 50 разів.

На рис. 4.3а,б,в показані СКВ помилок прогнозу положення цілі $\sqrt{P_x^*}$, $\sqrt{P_y^*}$, $\sqrt{P_z^*}$, реальних помилок прогнозу σ_x^* , σ_y^* , σ_z^* та математичні очікування помилок прогнозу m_x^* , m_y^* , m_z^* за кожною координатою, отримані методом Монте-Карло. СКВ реальних помилок прогнозу положення цілі добре узгоджуються з теоретичними, що отримані під час роботи фільтра на основі рівнянь (4.15)...(4.18), що підтверджує коректність роботи фільтра.

Для оцінки ефективності роботи алгоритму на рис.4.4 а,б,в СКВ помилок вимірювання положення цілі, σ_x , σ_y , σ_z , СКВ помилок прогнозу положення цілі $\sqrt{P_x^*}$, $\sqrt{P_y^*}$, $\sqrt{P_z^*}$, СКВ помилок оцінки положення цілі за кожною координатою $\sqrt{\hat{P}_x}$, $\sqrt{\hat{P}_y}$, $\sqrt{\hat{P}_z}$. Як видно з результатів, СКВ помилки оцінки приблизно в 2.5 рази менше, ніж СКВ помилки прямого вимірювання. Таким відбувається уточнення положення цілі. Важливо зазначити, що процес адаптації фільтра не є миттєвим і в даному випадку стабілізація коефіцієнту Калмана досягається приблизно на 17 кроці, а висока ефективність досягається в тому числі тому, що розглядається задача з слабо маневруючою ціллю.

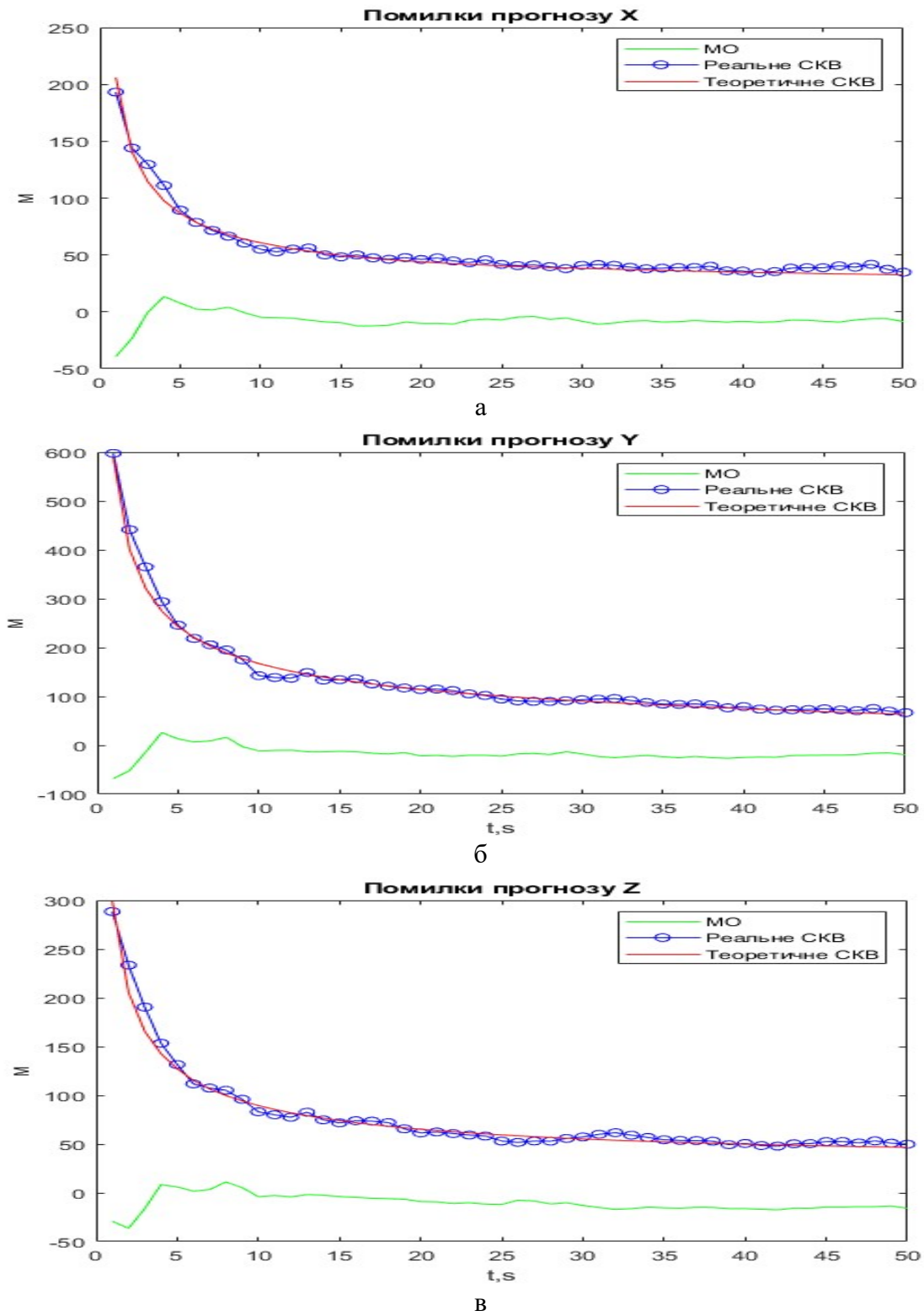


Рис 4.3— СКВ помилок прогнозу положення цілі, реальних помилок та математичних очікувань помилок прогнозу за координатами X (а), Y (б), Z (в) за даними РЛС.

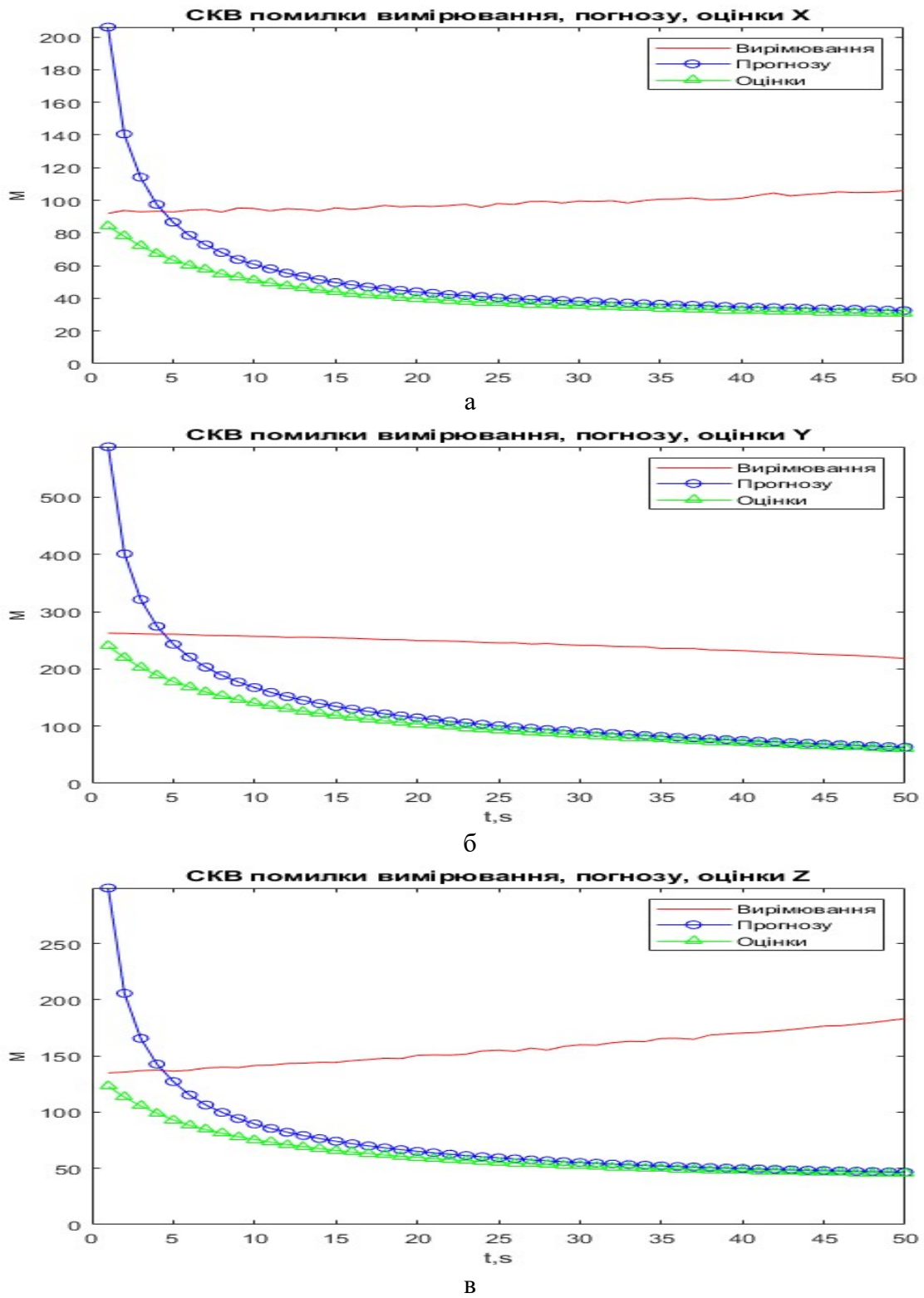


Рис 4.4— СКВ помилок вимірювання положення цілі, помилок прогнозу та оцінки за координатами X (а), Y (б), Z (в) за даними РЛС.

4.3 Траєкторна фільтрація за даними РДС

4.3.1 Алгоритм траєкторної фільтрації заданими РДС

Для опису руху цілі також використовується модель другого порядку, що описується рівнянням (4.1)

Для визначення координат цілі на основі МНК, РДС має включати не менш ніж 5 станцій[8]. Рівняння вимірювання РДС у декартовій системі координат, що прив'язана до опорної станції мають вигляд

$$d_{i0} = R_i - R_0 + v_i - v_0, i = \overline{1, n}, \quad (4.34)$$

де $R_i, i = \overline{0, n}$ – відстань між i -тою станцією та ціллю;

$d_{i0}, i = \overline{1, n}$ – різниці відстаней, що була виміряна;

$v_{i0}, i = \overline{0, n}$ – похибка вимірювання дальностей з дисперсією σ_v^2 .

Для визначення положення цілі вводиться вектор $u_2 = (x_2, y_2, z_2, R_0)^T$, що дозволяє привести нелінійну систему рівнянь (4.34) до лінійної. При використанні метода найменших квадратів оцінка u_{RDS} вектора u_2 та кореляційна матриця помилки оцінки визначаються за наступними формулами[9]:

$$u_{RDS} = 0.5(A^T \Sigma^{-1} A)^{-1} A^T \Sigma^{-1} b; \quad (4.35)$$

$$P_{RDS} = ((\bar{A}^0)^T (B \Sigma B)^{-1} \bar{A}^0)^{-1} \quad (4.36)$$

Подальший синтез адаптивного фільтра відбувається шляхом аналогічному тому, що описується в розділі 4.2.1, використовуючи формули (4.31)...(4.33).

4.3.2 Аналіз алгоритму шляхом статистичного моделювання

Аналіз синтезованого алгоритму траєкторної фільтрації параметрів руху цілі виконано методом статистичного моделювання. Для моделювання руху цілі використовувалась модель (4.19). На кожній ітерації статистичного моделювання генерувалася випадкова траєкторія цілі з малою маневреністю з параметрами $\sigma_{ax} = 1\text{м/с}^2$, $\sigma_{ay} = 1\text{м/с}^2$. Протягом всього часу моделювання ціль не змінює висоту, отже $\sigma_{az} = 0\text{м/с}^2$. У прикладі, що розглядається, станції РДС мають координати С0 (0; 0), С1 (3; 0), С2 (0; 2.9), С3 (-2.9;-0.5), С4 (1; -2.7) км. Помилка вимірювання $\sigma_v = 9\text{м}$, а темп надходження даних $T = 1\text{с}$. Моделювання проводилося 100 разів. Протягом кожного моделювання положення цілі вимірюється 50 разів.

На рис. 4.5а,б,в показані СКВ помилок прогнозу положення цілі $\sqrt{P_x^*}$, $\sqrt{P_y^*}$, $\sqrt{P_z^*}$, реальних помилок прогнозу σ_x^* , σ_y^* , σ_z^* та математичні очікування помилок прогнозу m_x^* , m_y^* , m_z^* за кожною координатою, отримані методом Монте-Карло. СКВ реальних помилок прогнозу положення цілі добре узгоджуються з теоретичними, що отримані під час роботи фільтра на основі рівнянь (4.15)...(4.18), що підтверджує коректність роботи фільтра.

Для оцінки ефективності роботи алгоритму на рис.4.6 а,б,в СКВ помилок вимірювання положення цілі, σ_x , σ_y , σ_z , СКВ помилок прогнозу положення цілі $\sqrt{P_x^*}$, $\sqrt{P_y^*}$, $\sqrt{P_z^*}$, СКВ помилок оцінки положення цілі за кожною координатою $\sqrt{\hat{P}_x}$, $\sqrt{\hat{P}_y}$, $\sqrt{\hat{P}_z}$. Як видно з результатів, СКВ помилки оцінки приблизно в 3 рази менше, ніж СКВ помилки прямого вимірювання. Видно, що у випадку фільтрації даних с РДС алгоритм досягає кращих результатів відносно прямого вимірювання, ніж у випадку з активною РЛС, що описаний описана у розділі 4.2 2. Крім того адаптація фільтра проходить повільніше, ніж у випадку а активною РЛС, і коефіцієнт Калмана стає стабільним на 25 кроці.

Такий ефект пов'язаний з тим, що в даній конфігурації РДС забезпечує відносно меншу точність вимірювання через невелику величину бази і точність вимірювання відстаней σ_v . Через це коефіцієнт Калмана налаштовується таким чином, щоб алгоритм, оцінюючи положення цілі, в більшій мірі спирався на достовірну статистичну модель цілі і в меншій на низькоточні вимірювання.

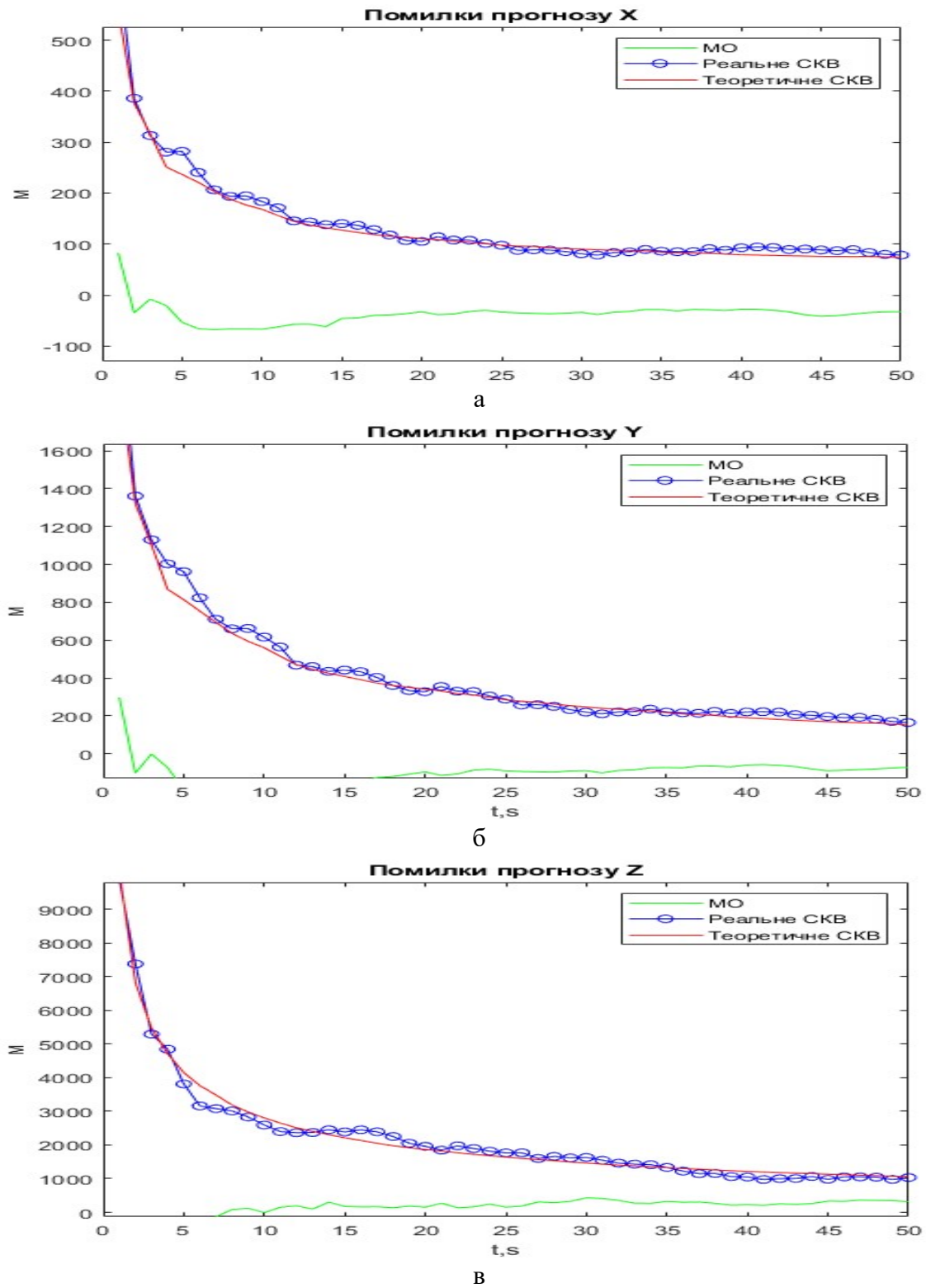
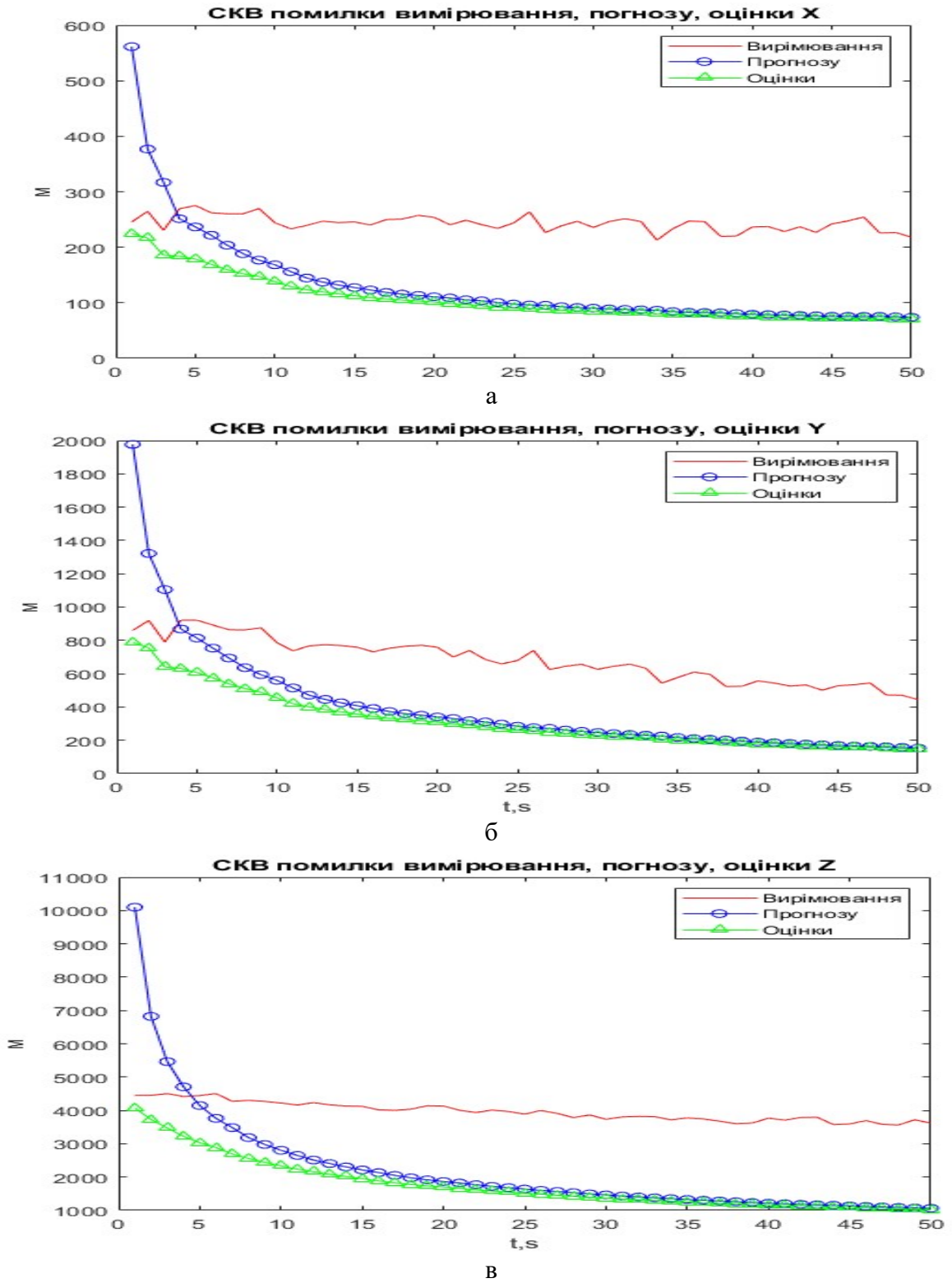


Рис 4.5— СКВ помилок прогнозу положення цілі, реальних помилок та математичних очікувань помилок прогнозу за координатами X (а), Y (б), Z (в) за даними РДС.



5 ТРАЄКТОРНА ФІЛЬТРАЦІЯ ПРИ ТРЕТИННІЙ ОБРОБЦІ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ДАНИМИ РЛС І РДС

Важливе практичне значення має створення інтегрованих комплексів моніторингу навколишнього простору на основі радіолокаційної (РЛС) та різницево-далекомірних систем (РДС), які дозволяють реалізувати переваги активних та пасивних радіотехнічних систем. Постає задача визначення точних характеристик траєкторної фільтрації при третинній обробці РЛІ за даними РЛС та РДС.

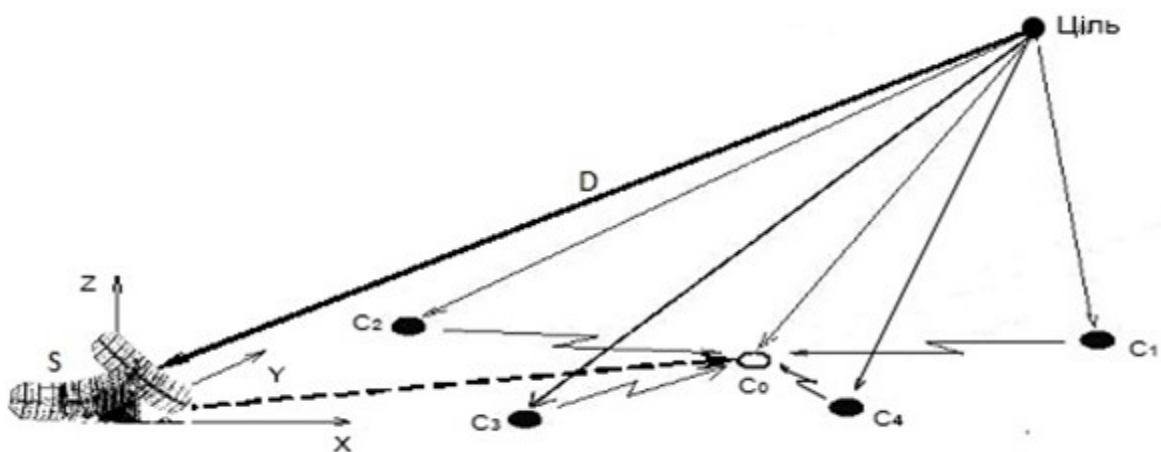


Рис.5.1— Комбінована система оцінки положення цілі.

5.1 Алгоритм траєкторної фільтрації при третинній обробці інформації за даними РЛС і РДС

У радіолокаційних системах, до складу яких входять кілька РЛС, виникають нові специфічні задачі обробки. Вони пов'язані з узагальненням (поєднанням) інформації про одну ціль, що надходить з декількох джерел. Тобто вирішення таких завдань в автоматизованій радіолокаційній системі як правило називають - третинною обробкою інформації, як було зазначено в попередніх розділах.

Серед основних операцій третинної обробки вирізняють:

- відбір і ототожнення радіолокаційних відміток, отриманих з різних джерел, що відносяться до однієї цілі;
- обчислення середніх оцінок параметрів траєкторій технічних цілей, з даними отриманими від декількох джерел.

Налічують два методи проведення операції з ототожнення:

- періодичний;
- послідовний.

В результаті проведених досліджень було підтверджено доцільність використання алгоритму періодичного узагальнення інформації. Тому варто зупинитися на особливостях реалізації такого алгоритму з урахуванням застосованої при траєкторній фільтрації на етапі вторинної обробки моделі руху цілі.

У процесі виконання перерахованих операцій третинної обробки використовуються результати вторинної обробки інформації від кожної локаційної станції. Інформація передається на пункт збору у вигляді повідомлень, кожне з яких відноситься до конкретної цілі, і містить наступні дані:

- 1) i - номер джерела інформації;
- 2) j - номер цілі, наданої i -тим джерелом;
- 3) (\hat{u}_{ij}, t_{ij}) — сукупність параметрів траєкторії j -ї цілі в системі координат i -ї РЛС в горизонтальній $\hat{u}_{ijxy}^T = (\hat{x}_{ij}, \hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ та вертикальній $\hat{u}_{ijz}^T = (\hat{z}_{ij}, \hat{z}_{ij})$ площинах в момент часу їх прив'язки t_{ij} ;
- 4) кореляційні матриці помилок оцінок параметрів траєкторії \hat{P}_{ij} ;
- 5) характеристики j -ї цілі за даними i -ї РЛС, до складу яких входять, наприклад:
 - характеристика державної приналежності — ХДП_{ij} ;
 - тип цілі — T_{ij} ;
 - склад цілі тощо;
- 6) ознаки цілі, отримані як результат попередніх етапів обробки, як наприклад:

- ознака новизни Π_{nij} , яка характеризує той факт, що j -а ціль є новою для i -ї РЛС (яка була щойно поставлена на супровід);
- ознака маневру цілі Π_{mij} , яка показує, що за даними i -ї РЛС j -а ціль здійснює маневр;
- ознака втрати цілі Π_{tij} , яка показує, що за даними цілі j -ї на i -й РЛС в поточному огляді є пропуск мітки.

Враховуючи вище зазначені дані, кожне повідомлення можна представити у вигляді

$$J_{ij} = (ij, \hat{u}_{ij}, \hat{P}_{ij}, X_{ij}, \Pi_{ij}, t_{ij}), \quad (5.1)$$

де X_{ij} —характеристики цілі; Π_{ij} —ознаки цілі.

В результаті третинної обробки на пункті збору формуються узагальнені повідомлення з кожної цілі у вигляді

$$J_n = (n, u_{nxy}^*, P_n^*, X_n, t_n), \quad (5.2)$$

де n —номер об'єднаного повідомлення (траєкторії). Такі повідомлення використовуються потім в системі управління для оцінки стану в зоні, що обслуговується пунктом збору інформації.

У першу чергу, в момент вирішення задач з ототожнення інформації, порівнюються координатні і швидкісні компоненти повідомлень, отриманих від різних джерел. Таке порівняння є доцільним тільки після зведення повідомлень до початку відліку в просторі і часі.

На першому етапі формуються матриці відповідності A_{nj}^i окремих трас J_{ij} узагальненим трасам J_n . Вони заповнюються шляхом попарного порівняння координатних і швидкісних складових повідомлень J_{ij} та J_n . Задля ототожнення повідомлень використовуються два головних правила. У першому випадку враховується взаємна кореляція між помилками оцінок параметрів траєкторії. Правило має наступний вигляд

$$(u_n^* - u_{ij}^*)^T D_{nij}^{-1} (u_n^* - u_{ij}^*) \leq l^2, \quad (5.3)$$

де l - відношення головних півосей еліпсоїда до середньо квадратичних відхилень помилок уздовж цих осей; D_{nij} - кореляційна матриця, яка визначається за формулою

$$D_{nij} = P_n^* + P_{ij}^*, \quad (5.4)$$

На етапі вторинної обробки вирішується задача формування строба супроводу, яка є аналогічною алгоритму (5.3). В нашому випадку в якості центру строба супроводу виступає вектор екстрапольованих параметрів узагальненої траси u_n^* . Стробом називають багатовимірний еліпсоїд, розміри якого визначаються необхідною ймовірністю попадання в нього вектора екстрапольованих параметрів окремої траси u_{ij}^* . Вірогідністю попадання вектора u_{ij}^* в межі строба визначається за формулою

$$P = \int_{\Delta u_{nij}^T D_{nij}^{-1} \Delta u_{nij} \leq l^2} (2\pi)^{-m/2} \det(D(k))^{-1/2} e^{-0.5 \Delta u_{nij}^T D_{nij}^{-1} \Delta u_{nij}} d\Delta u_{nij}, \quad (5.5)$$

де $m = 6$ – розмірність векторів u_{ij}^* , u_n^* ; u_{nij} – вектор, який визначається за формулою

$$\Delta u_{nij} = u_n^* - u_{ij}^*$$

Зі зростанням показників l , підвищується ймовірність ототожнення окремої «вірної» траси J_{ij} з узагальненою трасою J_n . Проте таким чином зростають розміри строба і вірогідність попадання в нього «хибних» трас.

Однак задля застосування головного правила (5.3) потрібно звести кореляційну матрицю D_{nij} розміром 6×6 , що може призвести до значних витрат в обчисленнях.

Друге правило, на відміну від першого, спрощується до незалежної перевірки неузгодженості елементів векторів u_{ij}^* , u_n^* . Ототожнювати окрему трасу

J_{ij} з узагальненою трасою J_n необхідно тільки тоді, коли одночасне виконуються наступні умови багатовимірної стробування

$$\left\{ \begin{array}{l} |x_n^* - x_{ij}^*| \leq \alpha \sqrt{d_{nij}^{11}} \\ |\dot{x}_n^* - \dot{x}_{ij}^*| \leq \alpha \sqrt{d_{nij}^{22}} \\ |y_n^* - y_{ij}^*| \leq \alpha \sqrt{d_{nij}^{33}} \\ |\dot{y}_n^* - \dot{y}_{ij}^*| \leq \alpha \sqrt{d_{nij}^{44}} \\ |z_n^* - z_{ij}^*| \leq \alpha \sqrt{d_{nij}^{55}} \\ |\dot{z}_n^* - \dot{z}_{ij}^*| \leq \alpha \sqrt{d_{nij}^{66}} \end{array} \right. , \quad (5.6)$$

де $d_{nij}^{55}, l = \overline{1,6}$ – діагональні елементи кореляційної матриці D_{nij} .

Параметр α обирається з врахуванням необхідної ймовірності правильного ототожнення.

Отже, в n -му рядку матриці A_{nj}^i вказуються j -і окремі траси i -ї РЛС, за якими було проведено ототожнення. Надалі з матриці A_{nj}^i видаляються рядки, які відповідають узагальненим трасам, за якими не було проведено ототожнення з окремими трасами i -ї РЛС. Аналогічно видаляються рядки, що відповідають окремим j -м трасам i -ї РЛС, за якими не проводилося ототожнення з узагальненими трасами.

Зазвичай з однієї узагальненої трасою можуть ототожнюватися кілька окремих траєкторій однієї РЛС, а саме, у рядку матриці A_{nj}^i може знаходитись більше, ніж один елемент. З узагальненою трасою може ототожнюватися тільки одна окрема траса від однієї РЛС. Тому на другому етапі виконується остаточний розподіл окремих трас за узагальненими траєкторіями. Для того, щоб її розв'язати використовується метод динамічного програмування.

Серед недоліків методу динамічного програмування налічують значні похибки в обчисленнях. Простий спосіб ототожнення, що вирішує зазначене вище питання, можливо отримати за аналогією такій задачі з завданням виділення «вірної» цілі при стробуванні. Вона вирішується на етапі вторинної обробки.

Такий результативний спосіб, який використовується для визначення «вірної» цілі в момент стробування, полягає у визначенні найближчої до центру строба цілі. Враховуючи проаналізовані вище особливості задачі третинної обробки ототожнення однією з окремих трас i -ї РЛС з n -ю узагальненою трасою має вигляд:

$$\min_j (u_n^* - u_{ij}^*)^T D_{nij}^{-1} (u_n^* - u_{ij}^*), \quad (5.7)$$

де D_{nij} - кореляційна матриця, яка визначається за формулою (5.4).

Ототожнення n -ї узагальненої траси виконується з тою окремою трасою i -ї РЛС, для якої значення квадратичної форми (5.7) мінімально.

Для реалізації алгоритму (5.7) потрібно звести кореляційну матрицю D_{nij} розміром 6×6 , що може призвести до значних витрат в обчисленнях. Простіше правило можна отримати за умови ігнорування моментів кореляції матриці D_{nij} . Воно представлено в такому вигляді:

$$\min_j \left\{ \frac{(x_n^* - x_{ij}^*)^2}{d_{nij}^{11}} + \frac{(\dot{x}_n^* - \dot{x}_{ij}^*)^2}{d_{nij}^{22}} + \frac{(y_n^* - y_{ij}^*)^2}{d_{nij}^{33}} + \frac{(\dot{y}_n^* - \dot{y}_{ij}^*)^2}{d_{nij}^{44}} + \frac{(z_n^* - z_{ij}^*)^2}{d_{nij}^{55}} + \frac{(\dot{z}_n^* - \dot{z}_{ij}^*)^2}{d_{nij}^{66}} \right\}, \quad (5.8)$$

У дужках виразу (5.8) визначається сума квадратів нормованих розбіжностей положень і швидкостей між n -ю узагальненою трасою та j -ю окремою i -ї РЛС.

Оскільки похибки оцінки швидкості досить великі, то можна обмежитися дослідженням нормованої розбіжності положення між узагальненою і окремою трасами. При цьому вираз (5.8) змінюється на:

$$\min_j \left\{ \frac{(x_n^* - x_{ij}^*)^2}{d_{nij}^{11}} + \frac{(y_n^* - y_{ij}^*)^2}{d_{nij}^{33}} + \frac{(z_n^* - z_{ij}^*)^2}{d_{nij}^{55}} \right\}, \quad (5.9)$$

Істотну користь у спрощенні алгоритмів може дати аналіз ознак цілі (нова ціль, ціль маневрує тощо) у разі ототожнення повідомлень. Проте остаточне рішення приймається, як правило, на основі порівняння квадратичних форм можливих варіантів ототожнення.

Вирішенням задачі вибору однозначного варіанта групування повідомлень закінчується етап точного ототожнення окремих трас за узагальненими трасами.

Наступною операцією з об'єднання інформації є обчислення координат об'єднаних повідомлень. В першу чергу ця задача приходить до усереднення координат і складових вектора швидкості за даними з декількох джерел (в загальному випадку джерела мають різну точність). Вирішення такої задачі в найпростішому випадку зводиться до знаходження середнього арифметичного координат і складових вектора швидкості повідомлень кожної цілі. Оскільки джерела повідомлень, як правило, мають різну точність, то правильним є усереднення з вагами, зворотно пропорційними дисперсіям помилок складових. Але можливо взяти в якості усереднених координат і складових вектора швидкості повідомлення, отримане від одного з джерел, якщо воно вважається більш достовірним.

Враховуючи досліджені вище особливості задачі третинної обробки оптимальний алгоритм обчислення координат об'єднаних повідомлень, а саме: поновлення координат n -ї узагальненої траси представлений виразом:

$$\hat{u}_n = \left(\sum_i P_{ij}^{*-1} + P_n^{*-1} \right)^{-1} \left(\sum_i P_{ij}^{*-1} u_{ij}^* + P_n^{*-1} u_n^* \right) \quad (5.10)$$

У виразі (5.10) об'єднуються вектори оцінок u_{ij}^* окремих трас i -тих РЛС, що пов'язані з n -ю узагальненою трасою. Як окремий доданок відокремлено і

вектор оцінок u_n^* узагальненої траси, що також є складовою операції з відновлення координат. Кореляційна матриця помилок оцінки координат оновленої n -ї узагальненої траси визначається за формулою

$$\hat{P}_n = \left(\sum_i P_{ij}^{*-1} + P_n^{*-1} \right)^{-1} \quad (5.11)$$

У виразі (5.11) окремий доданок відокремлений як зворотна матриця P_n^{*-1} , що враховує внесок n -ї узагальненої траси.

Можливі спрощення оптимального алгоритму відновлення координат (5.10), (5.11), за умови ігнорування моментів кореляції матриці P_{ij}^* і P_n^* , що може призвести до значних витрат в обчисленнях. Проте точність характеристики квазіоптимальних алгоритмів відновлення координат може бути визначена лише за допомогою статистичного моделювання на ЕОМ. Вектор оцінок \hat{u}_n і кореляційна матриця помилок оцінок \hat{P}_n n -ї узагальненої траси є початковими умовами для наступного такту об'єднання інформації. Задля зведення показників до одного часового показника виконується їх екстраполяція за допомогою співвідношень, аналогічних формулам (5.5), (5.6).

Продовжуючи розгляд вищезазначеної теми варто відзначити, що особливої уваги також заслуговує метод послідовного ототожнення інформації. Це перш за все обумовлено тим, що при вирішенні задач пов'язання забезпечуються мінімальні розміри області ототожнення, що відповідно дозволяє отримати максимальну точність зв'язування. Мінімальні розміри області ототожнення обумовлені тим, що кореляційна матриця \hat{P}_n помилок параметрів j -ї окремої траси i -ї РЛС визначається на момент фільтрації та забезпечує максимальну точність визначення координат. При визначенні кореляційної матриці помилок прогнозу P_n^* параметрів n -ї узагальненої траси також використовується найменший інтервал екстраполяції, який визначається часом надходження j -ї окремої траси та i -ї РЛС.

Зважаючи на проведені дослідження, метод послідовного аналізу третинної обробки аналогічний алгоритму супроводження цілі на етапі вторинної обробки. При цьому в якості вимірювань РЛС виступають параметри окремих трас, які зіставляються з супроводжувальними узагальненими траєкторіями.

Основними етапами послідовного аналізу є наступні:

- 1) Перерахунок параметрів j -ї окремої траси i -ї РЛС в систему координат пункту збору інформації з використанням виразів (5.3), (5.4) і визначення вектора оцінки параметрів руху \hat{u}_n і кореляційної матриці помилок оцінки \hat{P}_n ;
- 2) Екстраполяція параметрів усіх узагальнених трас на момент часу t_{ij} на основі виразів (5.5), (5.6) і визначення векторів прогнозу параметрів руху u_n^* і кореляційних матриць помилок прогнозу P_n^* , $n = \overline{1, N}$;
- 3) Ототожнення j -ї окремої траси i -ї РЛС з однією з узагальнених трас

$$\min_n (u_n^* - \hat{u}_{ij})^T D_{nij}^{-1} (u_n^* - \hat{u}_{ij}), \quad (5.12)$$

де D_{nij} - кореляційна матриця, яка визначається за формулою

$$D_{nij} = P_n^* + \hat{P}_{ij}, \quad (5.13)$$

В алгоритмі (5.12) враховується завжди апріорна інформація про те, що одна окрема траса РЛС може ототожнюватися тільки з однією узагальненою трасою. Для вирішення завдання ототожнення можуть бути використані і більш прості алгоритми виду (5.8) та (5.9).

- 4) Оновлення координат узагальненої траси, для якої було проведено ототожнення, за формулами

$$\hat{u}_n = \left(\sum_i \hat{P}_{ij}^{-1} + P_n^{*-1} \right)^{-1} \left(\sum_i \hat{P}_{ij}^{-1} \hat{u}_{ij} + P_n^{*-1} u_n^* \right) \quad (5.14)$$

$$\hat{P}_n = \left(\sum_i P_{ij}^{*-1} + P_n^{*-1} \right)^{-1} \quad (5.15)$$

Недоліком методу послідовного ототожнення є значне збільшення обчислень через необхідність екстраполяції параметрів всіх узагальнених трас за формулами (5.5), (5.6) на моменти часу надходження кожної окремої траси. Кількість екстраполяційних розрахунків визначається за формулою

$$L_{\text{посл}} = \sum_{i=1}^I J_i N \quad (5.16)$$

, де N - кількість трас, що супроводжуються; I - кількість РЛС; J_i - кількість окремих трас i -ї РЛС.

При паралельному ототожненні кількість екстраполяційних розрахунків визначається за формулою

$$L_{\text{парал}} = N + \sum_{i=1}^I J_i \quad (5.17)$$

В такому разі кількість операцій порівняння квадратичних форм при ототожненні трас зберігається однаковою, оскільки виконується перевірка кожної окремої траєкторії з кожною узагальненою траєкторією.

5.2 Аналіз алгоритму шляхом статистичного моделювання

Аналіз алгоритму третинної обробки траєкторій цілі, що були отримані з різних джерел виконувався шляхом статистичного моделювання. Моделювання було проведено для двох типів цілі: низькоманевреної та високоманевреної.

Для моделювання вимірювань низькоманевреної цілі параметри руху цілі та конфігурації РЛС та РДС обрані такими ж, як у розділах 4.2.2 та 4.3.2. Моделювання проводилося 100 разів і протягом кожної ітерації положення цілі вимірюється 50 разів.

На рис. 5.2а,б,в показані СКВ помилок комплексної оцінки положення цілі за кожною координатою, а також оцінки, отримані з РЛС і РДС. Видно, що під час роботи алгоритму відбувається уточнення відносно даних вхідних даних(відфільтровані дані з вимірювальних станцій). В середньому вдається покращити точність визначення координат цілі на 10-15%.

На практиці постає проблема неодноразовості вимірювань різних джерел інформації. На другому етапі моделювання розглядався режим роботи алгоритму, при якому обиралася одна основна станція, до часу якої будуть прив'язана робота системи в цілому, а замість оцінки положення цілі $\sqrt{\hat{P}}$ іншої станції, використовувався прогноз $\sqrt{P^*}$ на відповідний момент часу k . На рис 5.3а,б,в показані СКВ помилок комплексної оцінки положення цілі при одночасних вимірюваннях, при виборі РЛС як основної, та при виборі РДС, як основної. Очевидно, що при одночасних вимірювання станцій досягається найвища відносна ефективність роботи алгоритму. Варто зазначити, що на початкових відліках система, в якій у якості основної було обрано РЛС забезпечує вищу точність оцінки, але за часом втрачає перевагу і обидві системи досягають рівної точності оцінки. Такий ефект пояснюється тим, що до стабілізації параметрів адаптивного фільтру, що використовується на етапі вторинної

обробки, точність прогнозу положення цілі РДС є невисокою. Це підтверджується результатами, отриманими в розділі 4.3.2.

Для проведення більш детальної оцінки можливостей розробленого алгоритму проведено моделювання за умови спостереження за високоманевреною ціллю. Точносні параметри станцій обрані такими ж, як у розділах 4.2.2 та 4.3.2. Параметри цілі $\sigma_{ax} = 30 м/с^2$, $\sigma_{ay} = 30 м/с^2$, $\sigma_{az} = 15 м/с^2$. На відміну від попередніх моделювань, цілі змінює висоту польоту.

На рис. 5.4а,б,в показані СКВ помилок комплексної оцінки положення цілі за кожною координатою, а також оцінки, отримані з РЛС і РДС. Як очікувалось, оцінка положення високоманевреної цілі відбувається з меншою ефективністю відносно низькоманевреної цілі за рахунок менш точного прогнозу положення цілі на етапі вторинної обробки. Помилки прогнозу цілі зростають, тому зростає і помилка оцінки. Незважаючи на це, ефективність уточнення оцінки в середньому залишається на рівні 10-15%.

На рис. 5.5а,б,в в показані СКВ помилок комплексної оцінки положення цілі при одночасних вимірюваннях, при виборі РЛС як основної, та при виборі РДС, як основної. В даному випадку різниця між конфігураціями системи є більш помітними. За рахунок суттєвого зниження точності оцінки положення цілі за допомогою РДС, комплексування забезпечує в середньому на 15-20% нижчу ефективність уточнення, ніж варіант з основною РЛС.

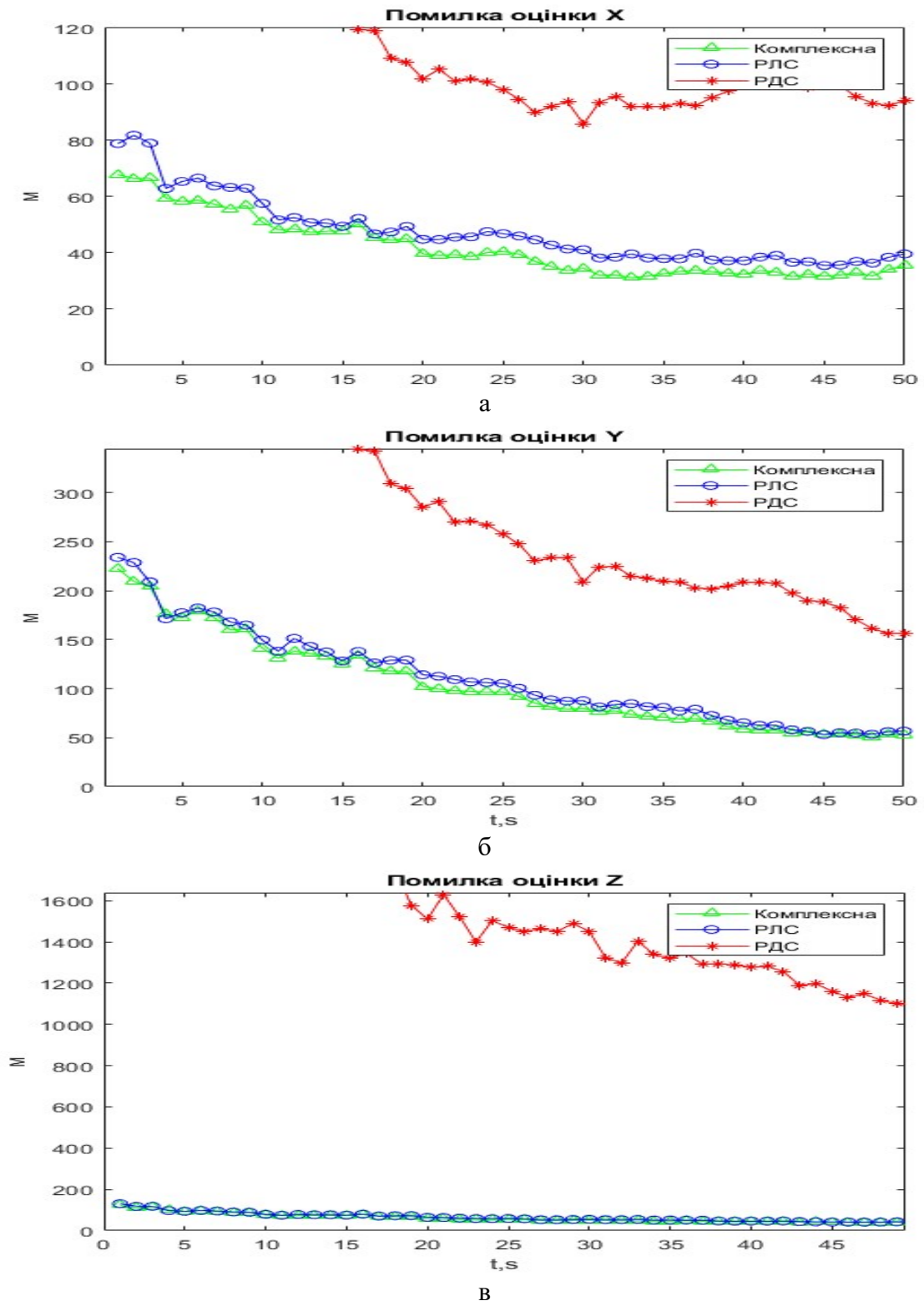


Рис. 5.2— СКВ помилок оцінки положення цілі за координатами X (а), Y (б), Z (в) за даними РЛС, РДС та комплексної системи для низькоманевреної цілі.

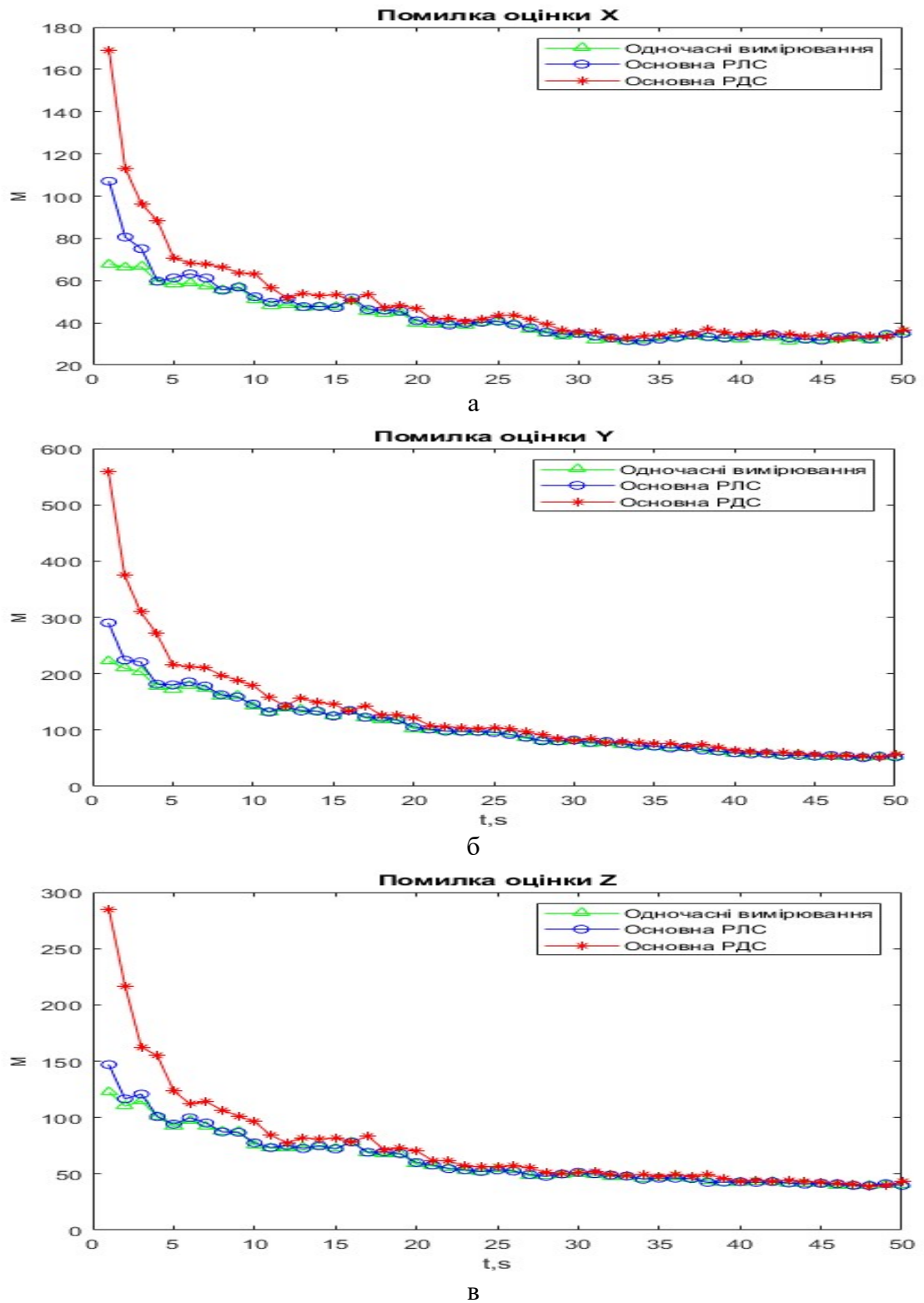
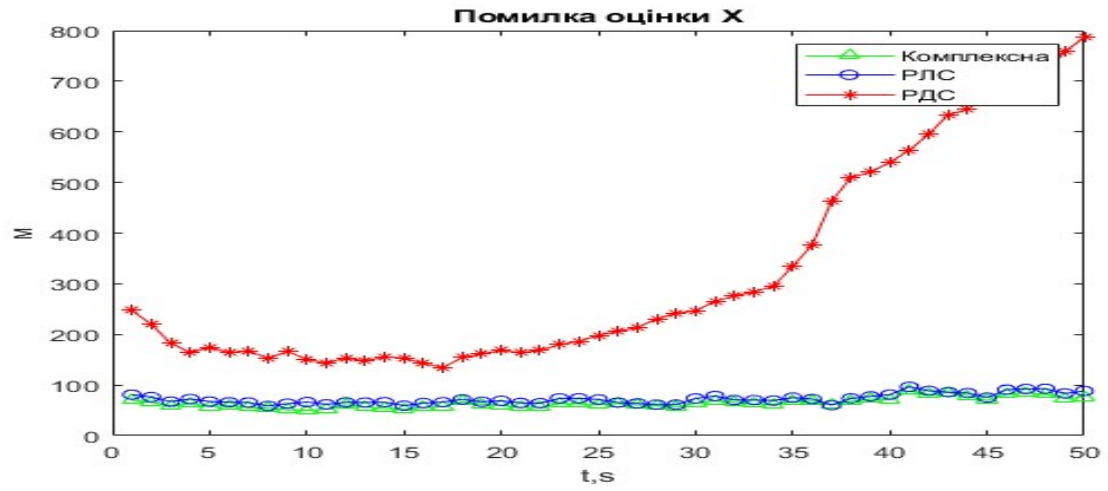
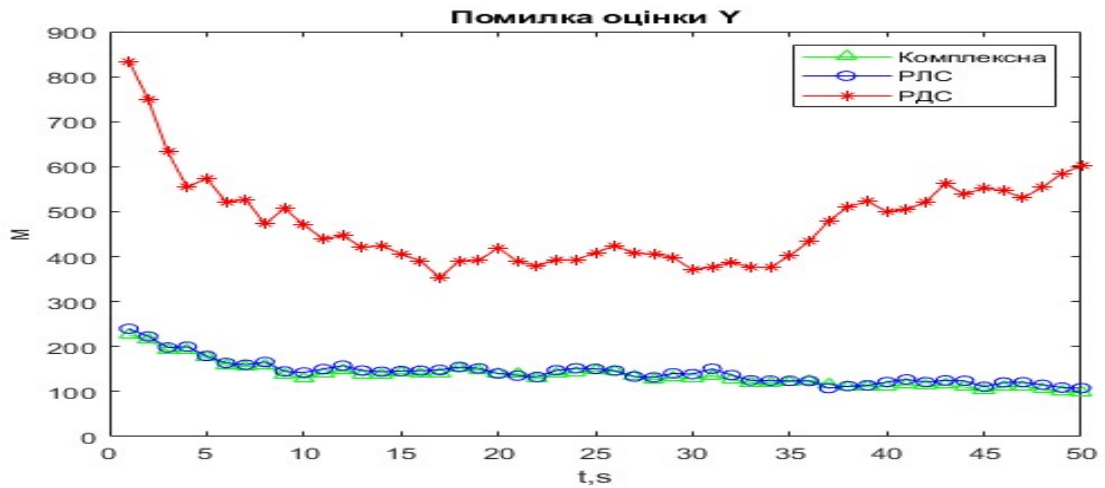


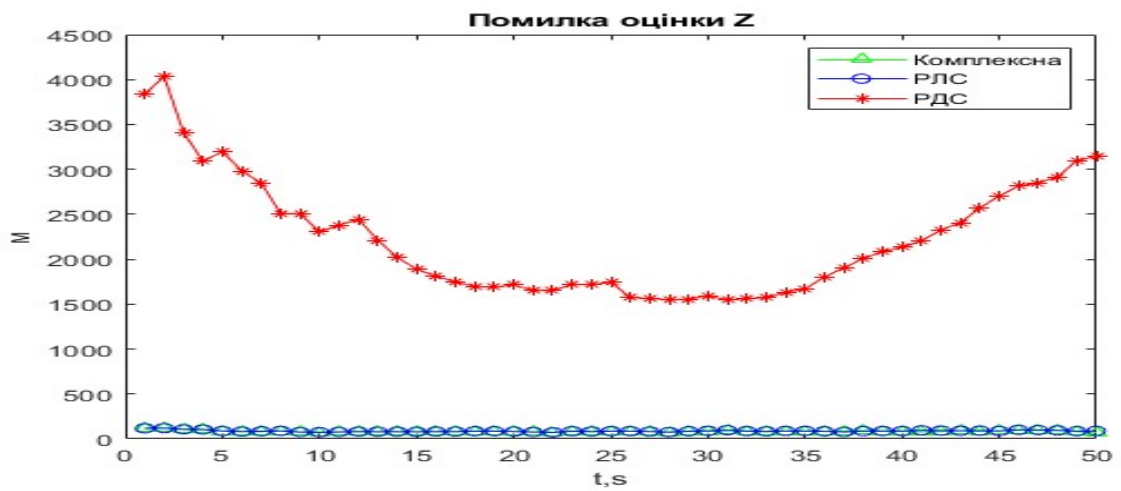
Рис. 5.3— СКВ помилок оцінки положення цілі за координатами X (а), Y (б), Z (в) за даними комплексної системи з одночасними та неодночасними вимірюваннями для низько-маневреної цілі



а



б



в

Рис. 5.4 — СКВ помилок оцінки положення цілі за координатами X (а), Y (б), Z (в) за даними РЛС, РДС та комплексної системи для високоманевреної цілі.

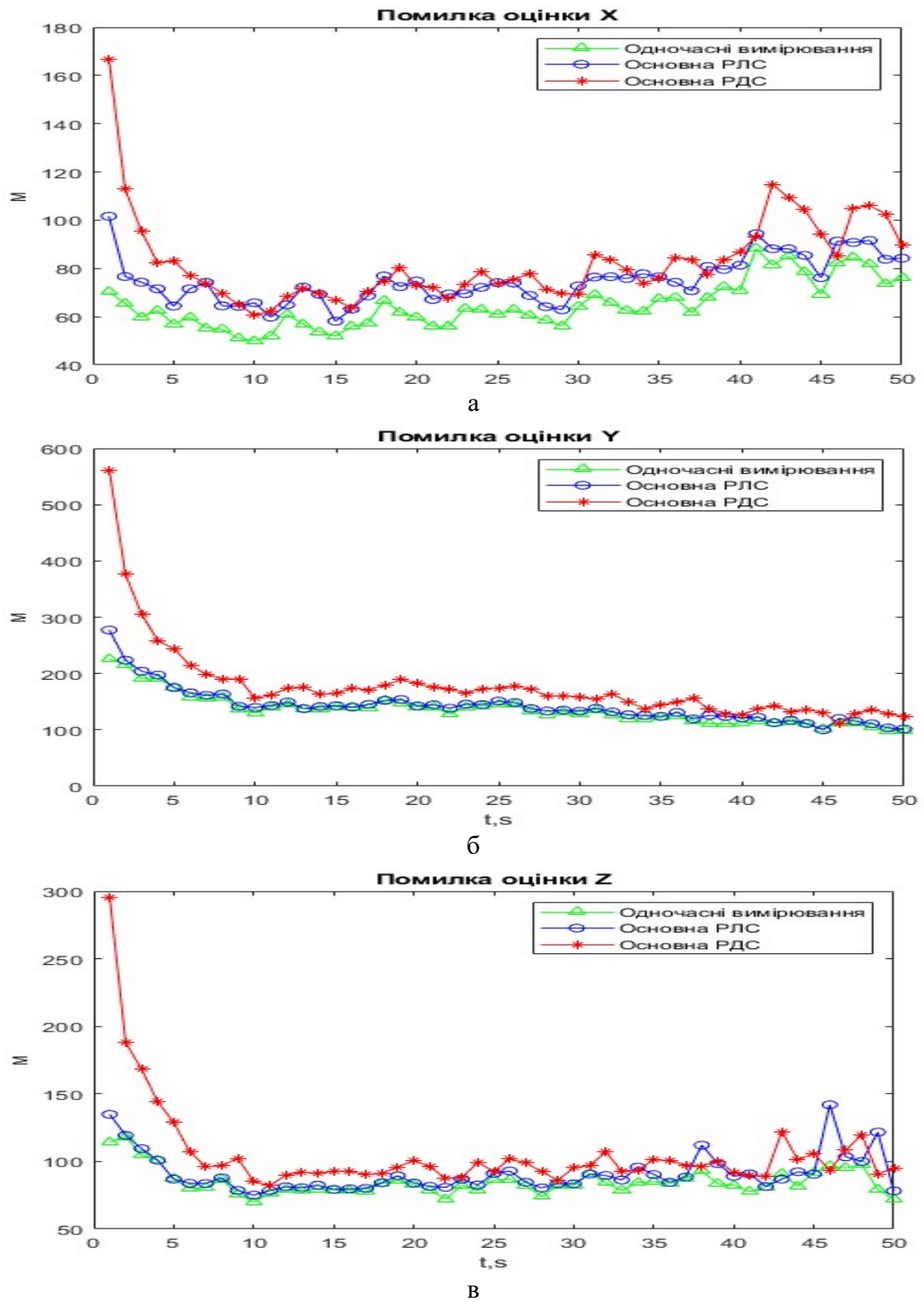


Рис. 5.3 — СКВ помилок оцінки положення цілі за координатами X (а), Y (б), Z (в) за даними комплексної системи з одночасними та неодночасними вимірюваннями для високоманевреної цілі

6 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ ТРАЄКТОРНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗА ДАНИМИ РЛС І РДСНА СУЧАСНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБАХ

Розглянемо вимоги до обсягу обчислень і кількості пам'яті при реалізації алгоритмів траєкторної фільтрації та комплексування на ЕОМ. В даному контексті основною характеристикою алгоритму є час, що витрачається на розрахунки, на один такт вимірювань. Цей час в рівній мірі визначається як швидкодією ЕОМ, так і загальним числом операцій обчислення. Точна оцінка з точки зору швидкодії ЕОМ є комплексною задачею і вимагає знання архітектури та системи інструкцій конкретної системи. Але при порівнянні різних способів обчислень задач, що розглядаються, достатнім наближенням для часу розрахунків можна вважати кількість необхідних операцій множення (ділення). Такі операції мають меншу швидкість виконання, ніж операції додавання в середньому в 8...10 разів при апаратній реалізації і в 100...150 разів повільніше при програмній реалізації (наприклад, у мікропроцесорних системах), тому основний час займає виконання саме цих операцій.

Необхідний обсяг пам'яті ОЗП визначається розмірністю відповідних векторів і матриць, що входять у рівняння (4.14)...(4.18). Ці дані наведені в табл. 6.1.

Відповідно до правил лінійної алгебри, можна визначити кількість операцій множення і додавання, необхідне для обчислення оцінки фільтрації та комплексування на один крок [13].

Результат розрахунків, що враховують витрати на кожному етапі обчислень, наведені у табл. 6.2.

Табл. 6.1 — Обсяг пам'яті для збереження змінних

Змінна	Розмірність	Необхідне число комірок ЗП
$\hat{u}(k)$	$n \times 1$	n
$F(k, k-1)$	$n \times n$	n^2
$K(k)$	$n \times s$	ns
$s(k)$	$s \times 1$	s
$H(k)$	$s \times n$	sn
$\hat{P}(k)$	$n \times n$	n^2
$R(k)$	$s \times s$	s^2
$P^*(k)$	$n \times n$	n^2
$G(k)$	n	n
$Q(k)$	$r \times r$	r^2
$u^*(k)$	$n \times 1$	n

При цьому передбачається, що обернена матриця розраховується за стандартним алгоритмом Гауса, який вимагає для своєї реалізації s^3 операцій множення й додавання, де $s \times s$ - розмірність матриці. Підсумовуючи дані, приведені в стовпцях 5 і 7 табл. 6.2 відповідно, одержуємо:

Загальна кількість операцій множення на один крок фільтрації:

$$M_{\phi}(n, s, r) = 3n^3 + 2n^2s + 2ns^2 + n^2r + nr^2 + 2ns + s^3 + n^2; \quad (6.1)$$

Загальна кількість операцій додавання на один крок фільтрації:

$$A_{\phi}(n, s, r) = 3n^3 + 2n^2s + 2ns^2 + n^2r + nr^2 + s^3 - 2n^2 - nr; \quad (6.2)$$

Як видно з наведених співвідношень, обсяг розрахунків пропорційний кубу розмірності системи.

Для моделі, розглянутої в попередніх розділах, одержуємо наступні результати:

$$M_{\Phi}(6,3,6) = 1503,$$

$$A_{\Phi}(6,3,6) = 1323.$$

Так як для фільтрації траєкторій з двох джерел інформації використовуються два незалежних фільтра, тому отримані результати необхідно подвоїти. Кінцева кількість операцій, що повинна бути виконана на етапі вторинної обробки становить

$$M_{II} = 3006,$$

$$A_{II} = 2646.$$

Кількість комірок пам'яті необхідна для реалізації дорівнює 480.

Аналогічним чином може бути отримана оцінка ресурсів, що буде задіяна при виконанні алгоритму комплексування.

Загальна кількість операцій множення на один крок комплексування:

$$M_{III}(n, s, r) = 3s^3 + 2n^2 + n^2r; \quad (6.3)$$

Загальна кількість операцій додавання на один крок комплексування:

$$A_{III}(n, s, r) = 3s^3 + s^2 + 2n^2 + n^2r - n^2 - 2n; \quad (6.4)$$

Для моделі, розглянутої в попередніх розділах, одержуємо наступні результати:

$$M_{III}(6,3,6) = 369,$$

$$A_{III}(6,3,6) = 330.$$

Кількість комірок пам'яті необхідна для реалізації дорівнює 41.

Розрахунки проводились спираючись на умову спостереження одиночної цілі. Орієнтовна кількість операцій, при обраному темпі надходженні інформації ($T = 1$ с) й обробці в реальному масштабі часу, становить приблизно 6351.

На сьогоднішній день для вирішення задачі обробки сигналів в реальному масштабі часу широко використовуються DPS-процесори. Перевагою таких мікропроцесорів є підтримка операції множення зі складанням. Можли-

вість виконувати такі операції суттєво відрізняє DSP-процесори від універсальних процесорів. Сучасні DSP-процесори переважно представлені виробниками Texas Instruments та Analog Devices.

Для реалізації запропонованого в роботі алгоритму оцінки оберемо сигнальний процесор TMS320C6747. Цей процесор працює на частоті 456 МГц, час виконання однієї інструкції складає 2.2 нс. Для виконання повного алгоритму оцінки положення цілі необхідно близько 25 мкс.

Табл. 6.2 — Кількість операції для розрахунку

Величина, що розраховується	Функціональна залежність	Поточний крок розрахунків	Кількість операцій множення	Загальна кількість операцій множення	Кількість операцій додавання	Загальна кількість операцій додавання
$\hat{u}(k k-1)$	$F(k, k-1)\hat{u}(k-1 k-1)$	$F\hat{u}$	n^2	n^2	n^2-n	n^2-n
$P(k k-1)$	$F(k, k-1)P(k-1 k-1) \times$ $\times F^T(k, k-1) + G(k, k-1) \times$ $\times Q(k-1)G^T(k, k-1)$	PF^T $F(PF^T)$ QG^T $G(QG^T)$ $F^T PF^T + GQG^T$	n^3 n^3 n^2 n^2r 0	n^3 $2n^3+n^2+n^2r$	n^3-n^2 n^3-n^2 n^2-nr n^2r-n^2 n^2	$2n^3-2n^2+n^2+n^2r-nr$
$K(k)$	$P(k k-1)H^T(k) \times$ $\times [H(k)P(k k-1) \times$ $\times H^T(k) + R(k)]^{-1}$	PH^T $H(PH)^T$ $HPH^T + R$ $[HPH^T + R]^{-1}$ $K(k)$	n^2s ns^2 0 s^3 ns^2	n^2s ns^2+s^3 $n^2s+2ns^2+s^3$	n^2s-ns ns^2-s^2 s^2 s^3 ns^2-ns	$n^2s+2ns^2-2ns+s^3$
$P(k k)$	$[1 - K(k)H(k)] \times$ $\times P(k k-1)$	KH $1 - (KH)$ $[1 - KH]P$	n^2s 0 n^3	n^3+n^2s	n^2s-n^2 n^2 n^3-n^2	$n^3+n^2s-n^2$
$\hat{u}(k k)$	$\hat{u}(k k-1) + K(k)[s(k) -$ $- H(k)\hat{u}(k k-1)]$	$H\hat{u}$ $s - H\hat{u}$ $K[s - H\hat{u}]$ $K\hat{u}(k k)$	ns 0 ns 0	$2ns$	$ns-s$ s $ns-n$ n	$2ns$
				$M(n, s, r)$		$A(n, s, r)$

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У даному розділі визначено основні потенційно шкідливі та небезпечні виробничі фактори, які мають місце при виконанні науково-дослідної роботи. Дана робота є дослідницькою, пов'язана, в основному, з використанням ВДТ ПЕОМ. Основну увагу приділено питанням щодо забезпечення безпеки та комфортних умов на робочих місцях користувачів ВДТ ПЕОМ, і в першу чергу, питанням електробезпеки в приміщенні науково-дослідної лабораторії.

Запропоновано технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії, а також визначені основні заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.

7.1 Визначення основних потенційно небезпечних і шкідливих виробничих чинників при виконанні науково-дослідної роботи.

В даній роботі розроблено алгоритм для більш точного визначення координат об'єктів. Даний алгоритм змодельовано в програмному середовищі Matlab. Оскільки основу роботи складають дослідження із використанням електронно-обчислювальних машин (ВДТ ПЕОМ), існує небезпека ураження електричним струмом, також можливий негативний вплив електромагнітного випромінювання ВДТ ПЕОМ.

Основні потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які можуть виникнути при проведенні наукових досліджень:

- небезпека ураження електричним струмом;
- наявність електромагнітного випромінювання;
- недостатня освітленість робочих місць;
- підвищений рівень шуму;

- незадовільні мікрокліматичні умови;
- група психофізичних факторів: перевантаження фізичне та психологічне;
- можливість виникнення НС тощо.

7.2 Технічне рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії.

7.2.1 Електробезпека

Наявне в робочому приміщенні науково-дослідної лабораторії електроустаткування відповідно до ДСТУ ІЕС 61140.2015 відноситься до I класу за електрозахистом (крім ВДТ ПЕОМ - II клас та вимірювальної техніки – 0I клас), так як воно має робочу ізоляцію і підключається до електромережі за допомогою трьохконтактної вилки, один з виводів якої підключений до заземленого виводу розетки. Підключення електрообладнання до електромережі виконане відповідно до вимог ПУЕ-2017 й НПАОП 40.1-1.21-98.

Робоче приміщення нежарке, сухе, відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки поразки персоналом електричним струмом, оскільки відносна вологість повітря не перевищує 75%, температура не більше 35°C, відсутні хімічно агресивні середовища (ПУЕ-2017), а також відсутня можливість одночасного дотику до металоконструкцій будівлі, що мають контакт із землею, та до струмопровідних елементів корпусів електроустаткування. Живлення електроприладів у робочому приміщенні здійснюється від 5-ти провідної трьохфазної електромережі із глухо заземленою нейтраллю та зануленням (система заземлення TN-S) напругою 220 В і частотою 50 Гц із використанням автоматів максимального струмового захисту.

Для зменшення значень напруг дотику й відповідних їм величин струму, при нормальному й аварійному режимах роботи електроустаткування необхідно виконати повторне захисне заземлення нульового дроту.

Виконаємо електричний розрахунок електромережі на перевірку вимикаючої здатності автоматів максимального струмового захисту.

Здатність екстреного вимикання мережі включає визначення значення струму К.З. і перевірку кратності його стосовно номінального струму пристроїв максимального струмового захисту. Вихідні дані для розрахунку:

а) $U_{\phi} = 220\text{В}$ – фазова напруга;

б) кабель чотирьох жильний, матеріал – алюміній ($\rho = 0,028 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$);

в) відстань від трансформатора до споживача (L) = 150м;

г) номінальний струм спрацьовування автомата захисту ($I_{\text{ном}} = 20 \text{ А}$), час його спрацьовування ($t_{\text{спр}} < 0,1 \text{ сек.}$) Струм однофазного К.З. визначається по формулі:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\phi} + R_0 + \frac{Z_m}{3}} = \frac{220}{2,3 + 2,4 + 0,16} = 45 \text{ А},$$

де:

$R_{\phi} = 2,3 \text{ Ом}$ – активний опір фазного проводу;

$R_0 = 2,4 \text{ Ом}$ – активний опір нульового проводу;

$Z_m/3 = 0,16 \text{ Ом}$ – розрахунковий опір трансформатора потужністю 250 Вт.

Кратність струму однофазного К.З. стосовно номінального струму спрацьовування автомата захисту. Для надійної роботи автомату захисту повинна виконуватись наступна:

$$K_{\text{м}} = \frac{I_{\text{к.з.}}}{I_{\text{ном}}} > 1,45$$

де $I_{\text{к.з.}}$ – струм короткого замикання (45А); $I_{\text{НОМ.}}$ – номінальний струм спрацювання автомату захисту (20А).

$$K_{\text{М}} = 2,25$$

З розрахунків видно, що при однофазному К.З. автомат максимального струмового захисту із електромагнітним розчеплювачем буде надійно спрацьовувати.

При однофазному К.З. максимальне значення напруги яка появиться на корпусі при аварійному режимі за час спрацювання максимального струмового захисту, $U_{\text{мах.}}$ щодо землі: $U_{\text{мах.}} = I_{\text{к.з.}} R_0 = 45 \cdot 2,4 = 108 \text{ В}$. Ця напруга менша $U_{\text{доп}} = 500 \text{ В}$ ($t_{\text{спр}} < 0,1 \text{ сек.}$) згідно ПУЕ-2017. З метою зниження $U_{\text{мах.}}$ як у нормальному, так і у аварійному режимі варто використовувати повторне заземлення нульового дроту.

7.2.2 Правила безпеки під час експлуатації ВДТ ПЕОМ

Діючі правила безпеки під час експлуатації ВДТ ПЕОМ регламентуються ДСанПІН 3.3.2.007–98 та діючим Положенням “ Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроями ”, які встановлюють вимоги безпеки та санітарно-гігієнічні вимоги до обладнання робочих місць користувачів ВДТ ПЕОМ і працівників, що виконують обслуговування, ремонт та налагодження ВДТ ПЕОМ, та роботи з застосуванням ВДТ ПЕОМ, відповідно до сучасного стану техніки та наукових досліджень у сфері безпечної організації робіт з експлуатації ВДТ ПЕОМ та з урахуванням положень міжнародних нормативно-правових актів з цих питань (директиви Ради Європейського союзу 90/270/ЄЕС, 89/391/ЄЕС, 89/654/ЄЕС, 89/655/ЄЕС, стандарти ISO, МРPII).

7.2.3 Вимоги до приміщень в яких розміщені ВДТ ПЕОМ

Організація робочих місць, обладнаних ВДТ ПЕОМ, повинна здійснюватися у відповідності до:

– ДСТУ ISO 9241-3-2001 «Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 3. Вимоги до відеотерміналів (ISO 9241-31992, IDT)»;

– ДСТУ ISO 9241-6:2004 «Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 6. Вимоги до робочого середовища»;

– ДСанПін 3.3.2.007-98 «Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Приміщення, в яких розташовані засоби обчислювальної техніки (ЗОТ) мають бути обладнані системами водяного опалення, кондиціонування або припливно-витяжною вентиляцією відповідно до СНиП 2.04.05-91.

Згідно з “ Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроями ” площу приміщень визначають із розрахунку, що на одне робоче місце вона має становити не менше ніж 6 м^2 , а об’єм не менше ніж 20 м^3 з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні. Приміщення являє собою кімнату розміром $7 \times 5 \text{ м.}$, висотою 4 м. Розмір дверного прорізу $1,5 \text{ м.}$

Площа й об’єм приміщення знаходимо по формулах:

$$S = a \cdot b,$$

$$V = S \cdot h,$$

де a – довжина, b – ширина, h – висота приміщення.

Маємо:

$$S = 10 \cdot 10 = 100 \text{ м}^2, V = 100 \cdot 4 = 400 \text{ м}^3.$$

Зведемо нормативні та фактичні дані приміщення в таблицю 7.1.

Табл.7.1 — Параметри приміщення

Назва характеристики	Нормативне	Фактичне
Площа приміщення з розрахунку	$>6 \text{ м}^2$	100 м^2
Об'єм приміщення з розрахунку на 1	$>20 \text{ м}^3$	400 м^3
Висота приміщення	3,5 – 4 м	4 м
Розміри дверей	$\geq 1,1 \times 1,8 \text{ м}$	$1,5 \times 2 \text{ м}$
Відстань від стіни зі світловими прорізами до ВДТ	$\geq 1 \text{ м}$	1,5 м

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що геометричні розміри приміщення цілком відповідають нормативним вимогам.

Оздоблюють стіни, стелю, підлогу приміщення з матеріалів, які дозволені органами державного санітарно-епідеміологічного нагляду. Заборонено застосовувати полімерні матеріали (деревостружкові плити, шпалери, що можна мити, рулонні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик, тощо), що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини. За розміщенням робочих місць з ВДТ ПЕОМ потрібно витримувати такі відстані: від стін зі світловими прорізами не менше 1 м; між бічними поверхнями ВДТ не менше 1,2 м; між тильною поверхнею одного ВДТ та екраном іншого не менше 2,5 м; прохід між рядами робочих місць не менше 1 м. Робочі місця з ВДТ щодо світлових прорізів розміщують так, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва. Екран ВДТ і клавіатура мають розміщуватися на оптимальній відстані від очей користувача, але не ближче 600 мм з урахуванням розміру алфавітно-цифрових знаків і символів. Розміщення екрана ВДТ має забезпечувати зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом $\pm 30^\circ$ від лінії зору працівника.

Усі вище перераховані вимоги відповідають робочому приміщенню, де проводяться дослідження.

7.2.4 Відповідність параметрів мікроклімату в робочій зоні санітарним нормам

Для нормалізації мікроклімату, згідно з ДСанПін 3.3.2.007-98 та ДСН 3.3.6.042–99. «Державні санітарні норми параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях», приміщення з ЗОТ повинно бути обладнане системою опалення, а також системою кондиціювання повітря з індивідуальним регулюванням температури та об'єму повітря, що подається, у відповідності до СНиП 2.04.05–91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование». Для захисту від перегрівання в теплий період року та радіаційного охолодження — в зимовий, приміщення обладнане жалюзі і екранами.

На робочому місці роботи виконуються сидячи і не потребують фізичного напруження. Таким чином їх можна віднести до категорії Іа, що охоплює види діяльності з витратами енергії до 120 ккал/год.

Відповідно до ДСН 3.3.6.042–99 «Державні санітарні норми параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях» та ГОСТ 12.005-88. «ССБТ.Общесанитарно–гигиеническиетребования к воздуху раб очей зоны» параметри мікроклімату, що нормуються: температура ($t, ^\circ\text{C}$) і відносна вологість ($W, \%$) повітря, швидкість руху повітря ($V, \text{м/с}$).

Оптимальні та допустимі параметри мікроклімату для умов, що розглядаються (категорія робіт та період року) наведені в табл.7.2.

Табл.7.2 — Параметри мікроклімату

Період Року	Оптимальні			Допустимі		
	$t, ^\circ\text{C}$	$W, \%$	$V, \text{м/с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$W, \%$	$V, \text{м/с}$
Теплий	23-25	40-60	0,1	22-28	55	0,2-0,1

Холодний	22-24	40-60	0,1	21-25	75	$\leq 0,1$
----------	-------	-------	-----	-------	----	------------

Фактичні параметри мікроклімату в робочій зоні відповідають приведеним вище нормам ДСН 3.3.6.042–99.

7.2.5 Вимоги до освітлення робочих місць користувачів відеодисплейних терміналів персональних електронно-обчислювальних машин.

Приміщення з ПЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В 2.5–28–2018. Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ чи північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5 %. Розрахунки коефіцієнта природної освітленості проводяться відповідно до ДБН В.2.5–28–2006. Приміщення з ВДТ, ПЕОМ мають бути оснащені природним і штучним освітленням відповідно до ДБН В.2.5–28–2006. Природне освітлення має здійснюватись через світлові прорізи, які орієнтовані переважно на північ чи північний схід і обладнані регулювальними пристроями відкривання та жалюзями, завісками, зовнішніми козирками.

Приміщення має бічне природне та штучне освітлення, центральне водяне опалення. У приміщенні три вікна розміром 2х2,2 м. Штучне освітлення забезпечує чотири люмінесцентних світильники з лампами ЛБ –40, розміщених у ряд.

Отже, усі вимоги до освітлення робочого місця відповідають параметрам освітлення приміщення, де проводяться дослідження.

7.2.6 Виробничий шум

Для умов, що розглядаються в проекті характеру роботи, який можна

класифікувати як роботу програміста обчислювальної машини у лабораторії для теоретичних робіт та обробки даних, рівні шуму визначені ДСН 3.3.6.037–99. «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Допустимі рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот представлені у табл. 7.3.

Табл.7.3 — Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного (непостійного) широкосмугового (тонального) шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих									Допустимий рівень звуку (дБ)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Інженер лабораторії	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Джерелами шуму в умовах робочого приміщення, що розглядається в роботі є вентилятори охолодження внутрішніх систем персонального комп'ютера (вентилятори блоку живлення, радіатора процесора та відеокарти) і система кондиціонування повітря.

Очікувані рівні звукового тиску і рівень звуку відповідно до шумових характеристик цих джерел:

– рівень звуку, створюваний внутрішніми елементами персонального комп'ютера дорівнює 35 дБА;

– рівень звуку системи кондиціонування на низьких/високих частотах дорівнює 25/30 дБА.

Сумарний рівень звуку не перевищує допустимих норм, умови робочого приміщення повністю відповідають існуючим санітарним вимогам.

7.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в надзвичайних ситуаціях регламентується ПЛАС. Основними складовими частинами ПЛАС є розробка технічних рішень та організаційних заходів щодо оповіщення, евакуації та дій персоналу у разі виникнення надзвичайних ситуацій, а також визначення основних заходів з пожежної безпеки.

7.3.1 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації

У разі виявлення ознак НС працівник, який їх помітив повинен:

- негайно повідомити про це засобами зв'язку органи ДСНС та пожежної охорони, вказати при цьому адресу, кількість поверхів, місце виникнення пожежі, наявність людей, а також своє прізвище;
- повідомити про НС керівника, адміністрацію, пожежну охорону підприємства;
- організувати оповіщення людей про НС;
- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;
- вжити заходів щодо ліквідації наслідків НС з використанням наявних засобів.

Керівник та пожежна охорона установки, яким повідомлено про виникнення пожежі, повинні:

- перевірити, чи викликані підрозділи ДСНС;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;

- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію, та їх рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації НС;
- перевірити здійснення оповіщення людей про НС;
- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть участь у ліквідації НС ;
- організувати зустріч підрозділів ДСНС та Державної пожежної охорони, надати їм допомогу у локалізації і ліквідації НС.

Після прибуття на НС підрозділів ДСНС та пожежної охорони повинен бути забезпечений безперешкодний доступ їх до місця, де виникла НС.

7.3.2 Вимоги щодо організації ефективної роботи системи оповіщення персоналу при надзвичайних ситуаціях.

Для підвищення безпеки в надзвичайних ситуаціях (НС) пропонується встановлення системи оповіщення (СО) виробничого персоналу.

Оповіщення виробничого персоналу у разі виникнення НС, наприклад при пожежі, здійснюється відповідно до вимог НАПБ А.01.003-2009.

Оповіщення про НС та управління евакуацією людей здійснюється одним з наступних способів або їх комбінацією:

- поданням звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;
- трансляцією текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямки руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;
- трансляцією спеціально розроблених текстів, спрямованих на запобігання паніці й іншим явищам, що ускладнюють евакуацію;
- ввімкненням евакуаційних знаків "Вихід";
- ввімкненням евакуаційного освітлення та світлових покажчиків напрямку евакуації;

– дистанційним відкриванням дверей евакуаційних виходів;

Як правило, СО вмикається автоматично від сигналу про пожежу, який формується системою пожежної сигналізації або системою пожежогасіння. Також з приміщення оперативного (чергового) персоналу СО (диспетчера пожежного поста) слід передбачати можливість запуску СО вручну, що забезпечує надійну роботу СО не тільки при пожежі, а і у разі виникнення будь-якої іншої НС.

Згідно з вимогами ДБН В.1.1-7-2016 необхідно забезпечити можливість прямої трансляції мовленнєвого оповіщення та керівних команд через мікрофон для оперативного реагування в разі зміни обставин або порушення нормальних умов евакуації виробничого персоналу.

Оповіщення виробничого персоналу про НС /пожежу/ здійснюється за допомогою світлових та/або звукових оповіщувачів – обладнуються всі виробничі приміщення.

СО повинна розпочати трансляцію сигналу оповіщення про НС (пожежу), не пізніше трьох секунд з моменту отримання сигналу про НС (пожежу).

Пульти управління СО необхідно розміщувати у приміщенні пожежного поста, диспетчерської або іншого спеціального приміщення (в разі його наявності). Ці приміщення повинні відповідати вимогам ДБН В.2.5-56-2014..

Кількість звукових та мовленнєвих оповіщувачів, їх розміщення та потужність повинні забезпечувати необхідний рівень звуку в усіх місцях постійного або тимчасового перебування виробничого персоналу.

Звукові оповіщувачі повинні комбінуватися зі світловими, які працюють у режимі спалахування, у таких випадках:

- у приміщеннях, де люди перебувають у шумозахисному спорядженні;
- у приміщеннях з рівнем шуму понад 95 дБ.

Допускається використовувати евакуаційні світлові покажчики, що автоматично вмикаються при отриманні СО командного імпульсу про початок

оповіщення про НС /пожежу/ та (або) аварійному припиненні живлення робочого освітлення.

Вимоги до світлових показчиків "Вихід" приймаються відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 "Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення".

СО в режимі "Тривога" повинна функціонувати протягом часу, необхідного для евакуації людей з будинку, але не менше 15 хвилин.

Вихід з ладу одного з оповіщувачів не повинен призводити до виведення з ладу ланки оповіщувачів, до якої вони під'єднанні.

Електропостачання СО здійснюється за I категорією надійності згідно з "Правилами устро́йства електроустановок" (ПУЕ) від двох незалежних джерел енергії: основного – від мережі змінного струму, резервного – від акумуляторних батарей тощо.

Перехід з основного джерела електропостачання на резервний та у зворотному напрямку в разі відновлення централізованого електропостачання повинен бути автоматичним.

Тривалість роботи СО від резервного джерела енергії у черговому режимі має бути не менш 24 годин.

Тривалість роботи СО від резервного джерела енергії у режимі "Тривога" має бути не менше 15 хвилин.

Звукові оповіщувачі повинні відповідати вимогам ДСТУ EN 54-3:2003 "Системи пожежної сигналізації. Частина 3. Оповіщувачі пожежні звукові".

Світлові оповіщувачі, які працюють у режимі спалахування, повинні бути червоного кольору, мати частоту мигтіння в межах від 0,5 Гц до 5 Гц та розташовуватись у межах прямої видимості з постійних робочих місць.

7.3.3 Пожежна безпека

Відповідно до ДСТУ Б.В.1.1-36:2016 “ Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною небезпекою ” робоче приміщення науково-дослідної лабораторії відноситься до категорії В за вибухопожежною небезпекою. Відповідно до ПУЕ-2017 та НПАОП 40.1-1.32-01 клас робочих зон за пожежонебезпекою – П-Па. Можливими причинами пожежі в приміщенні є несправність електроустаткування, коротке замикання проводки, і порушення протипожежного режиму (використання побутових нагрівальних приладів, паління). У зв’язку з цим, відповідно до вимог ПБЕ та ПУЕ, необхідно передбачити наступні заходи:

1. Ретельну ізоляцію всіх струмоведучих провідників електроустановок (ЕУ), періодичний огляд та перевірку ізоляції.
2. Суворе дотримання норм протипожежної безпеки на робочих місцях.
3. Відповідні організаційні заходи (заборона паління, інструктаж).

Приміщення обладнане чотирма пожежними сповіщувачами типу ДТЛ (площа, що знаходиться під захистом одного датчика, становить 15 м²), відстань між сповіщувачами дорівнює 4 м, що відповідає нормам ДБН В.2.5-56-2014. Відповідно до ISO 3941-2007 для гасіння пожежі в робочому приміщенні (клас пожежі „Е” – наявність електрообладнання під напругою) використовуються два вогнегасники вуглекислотно-брометиленові ОУБ-3. Вибір вогнегасної речовини ґрунтується на тому, що у вогні можуть опинитись електричні пристрої, що знаходяться під напругою.

Таким чином, кількість, розміщення й вміст первинних засобів гасіння пожеж цілком задовольняють всім вимогам ISO 3941-2007. Крім того, у коридорі є 2 пожежних крана і ящик з піском. Дотримано усіх заходів безпеки відповідно до НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Дотримано усі вимоги ДБН В.1.1-7-2016 по вогнестійкості будинку і ширині евакуаційних проходів і виходів із приміщень назовні. Значення основних параметрів шляхів евакуації приведені в таблиці 7.4.

Табл.7.4 — Характеристики і норми евакуаційних виходів

Параметр	Фактичне значення	Норма
Висота дверних прорізів	2,0 м	Не менше 2 м
Ширина дверних прорізів	1,5 м	Не менше 0,8 м
Ширина проходу для евакуації	Більше 1,5 м	Не менше 1 м
Ширина коридору	3 м	Не менше 2 м
Число виходів з коридору	2	Не менше 2
Ширина сходової клітки	1,5 м	Не менше 1 м
Висота поруччя сходів	1 м	Не менше 0,9 м

ВИСНОВКИ

У дисертації була вирішена технічна задача, суть якої полягає в розробці алгоритму комплексної оцінки положення повітряної цілі на основі даних активної та пасивної радіолокаційних систем.

Основні наукові результати, що були досягнуті, полягають в наступному:

1. Проведено аналіз актуальності поставленої задачі. Розглянуті типові рішення, на базі яких ґрунтуються сучасні радіолокаційні системи. Визначено, що сучасні системи досі потребують ефективних рішень для уточнення положення повітряних цілей

2. Розглянуті базові методи визначення положення повітряних цілей. Проведено аналіз переваг та недоліків систем активної та пасивної локації.

3. Розроблено та реалізовано алгоритм вторинної обробки РЛП на основі моделі руху цілі другого порядку. Проведено статистичне моделювання роботи алгоритму, яке показало високу ефективність траєкторної фільтрації. При спостереженні за низькоманевреною ціллю і темпі проведення вимірювань $T=1\text{с}$, СКВ помилок оцінки положення цілі приблизно в 2.5 рази нижче ніж СКВ прямих вимірювань для активної РЛС і приблизно в 3 рази для РДС. Результати моделювання роботи алгоритму добре узгоджуються з теорією.

4. Розроблено та реалізовано алгоритм третинної обробки РЛП за даними с РЛС і РДС. Проведено статистичне моделювання роботи алгоритму, що показало високу ефективність комплексного підходу до оцінки параметрів руху цілі. Незалежно від характеру цілі (низькоманеврена або високоманеврена) досягнуто підвищення кінцевої точності оцінки на 15-20% відносно результатів отриманих на етапі вторинної обробки.

5. Проведено моделювання роботи алгоритму при ситуації, коли вимірювання незалежних станцій проводяться неодноразово. Результати показали, що при використанні вимірювань РЛС як основних дозволяють алгоритму третинної обробки працювати більш ефективно і наближуватись до випадку з одночасними вимірюваннями. Отже, використання навіть менш точних вимірювань (у випадку, що розглядається, РДС має в середньому 8 разів нижчу точність, відносно РЛС) як допоміжних дає можливість покращити точність оцінки. Використання менш точних вимірювань як основних знижує точність кінцевої оцінки приблизно на 15-20% відносно одночасних вимірювань.

6. Проаналізована складність розрахунків, що необхідно проводити на кожному кроці вимірювань. Для одного кроку комплексного алгоритму необхідно виконати 3375 операцій множення та 2976 операцій додавання. Таку високу обчислювальну потужність можуть забезпечити DSP-процесори, які активно використовуються для побудови систем, що працюють в реальному масштабі часу. Їх важливою особливістю є підтримка операцій множення зі складанням, що скорочує час розрахунків. Для практичної реалізації системи запропоновано використання DSP-процесору TMS320C6747 від Texas Instruments.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Мобильная радиолокационная станция дежурного режима «Небо-СВУ» [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://structure.mil.ru/structure/forces/air/weapons/air_defense/more.htm?id=10393096@morfMilitaryModel.
2. РЛС 59Н6-Е "Противник-ГЕ" Краткое описание [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://pvo.guns.ru/rtv/protivnik.htm>.
3. Кольчуга-М зроблено в Україні . Збройова колекція [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://ukrenerho.com/kolchuga-m-zrobleno-v-ukrayini-zbrojova-kolektsiya/>
4. Вега (комплекс радиотехнической разведки) [Электронный ресурс] – Режимдоступудоресурсу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вега_\(комплекс_радиотехнической_разведки\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вега_(комплекс_радиотехнической_разведки)).
5. Ботов М. И. Основы теории радиолокационных систем и комплексов / М. И. Ботов, В. А. Вяхирев. – Красноярск: СФУ, 2013. – 91 с.
6. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems / Kalman. // Transaction of the ASME—Journal of Basic Engineering. – 1960. – pp. 35–45.
7. Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М. Динамические системы, устойчивые к отказам. -М.: Радио и связь, 1985. -12с.
8. Симаков В.А. Построение адаптивных систем пассивной радиолокации на принципах разностно-дальномерной координатометрии / В.А. Симаков // Научные ведомости Белгородский государственный университет . – 2005. –№2. –с. 221.
9. I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk (2017). Recurrent Algorithm for TDOA Localization in Sensor Networks, J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos

Campos, Vol.9, №4, pp.489-494, Oct.-Dec., 2017.
<http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v9i4.727>

10. Фари́на А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ.—М.: Радио и связь, 1993. - 320с.

11. Э. Сейдж, Дж. Мелс. Теория оценивания и её применение в связи и управлении. -М.: Связь, 1976. -496с.

12. Товкач И. О. Точностные характеристики определения координат цели при комплексном использовании данных радиолокационной и разностно-дальномерной систем / И. О. Товкач, С. Я. Жук, М. В. Балакирев. // РАДИОТЕХНІЧНІ ПОЛЯ, СИГНАЛИ, АПАРАТИ ТА СИСТЕМИ. – 2019. – С. 69–71.

13. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. –М.: Радио и связь, 1991. –608с.

14. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. –Киев: КВіЦ, 2000. – 428 с.

15. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.

16. Партала А. Н., Волков В. В., Стефанович А. В. Методы обработки сигналов в пассивных радиолокационных системах. – Зарубежная радиоэлектроника, 1991, № 6.

17. Алгоритмы пассивной локации в распределенной сети датчиков по разностно-дальномерному методу / Г.В.Бузуверов, О.И. Герасимов. –М. : Информационно-измерительные и управляющие системы №5, 2008. –12 с.

18. Канащенков А. И., Меркулов В. И., Самарин О. Ф. Облик перспективных радиолокационных систем. Возможности и ограничения. – М.: ИПРЖР, 2002.